

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Институт прикладной математики и механики

Работа допущена к защите
Директор высшей школы
прикладной математики и
вычислительной физики
_____ Л.В. Уткин
«__» _____ 2020 г.

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

**МЕТОД И АЛГОРИТМ ДВУСТОРОННЕГО СОГЛАСОВАНИЯ
НЕПРЕРЫВНОЙ МОДЕЛИ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА С
ДИСКРЕТНОЙ МОДЕЛЬЮ В СРЕДЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ SUMO**

по направлению подготовки 02.04.01 – Математика и компьютерные науки

Направленность (профиль) 02.04.01_03 – Высокопроизводительные облачные
вычисления и программное обеспечение роботов

Выполнил
студент гр. 3640201/80301

Р.С. Ожерельев

Руководитель
доцент ВШПМиВФ ИПММ,
к.т.н.

Л.М. Курочкин

Научный консультант
вед. программист ВШПМиВФ ИПММ,

М.В. Чуватов

Санкт-Петербург

2020

РЕФЕРАТ

На 76 с., 21 рисунок, 5 таблиц, 3 приложения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: SUMO, ДИСКРЕТНАЯ МОДЕЛЬ, ТРАНСПОРТНЫЙ ПОТОК, МНОГОПРОЦЕССОРНАЯ СИСТЕМА.

Тема выпускной квалификационной работы: «Метод взаимодействия экземпляров дискретной модели транспортной системы в многопроцессорной системе».

Данная работа посвящена исследованию разделения целостной модели транспортного потока на сегменты, выявление оптимального метода и нахождению допустимой точности исследования. Задачи, которые решались в ходе исследования:

1. Изучение особенности разделения на сегменты транспортной модели.
2. Выявление наиболее часто встречающихся проблем при сегментации.
3. Исследование производительности и анализ точности моделирования.

Имитационная модель была разработана на базе дискретного симулятора SUMO при помощи языка программирования Python 3.6. В ходе работы были задействованы множества библиотек данной среды разработки. В результате была проанализирована технология сегментации целостной модели транспортного потока. Разработаны и найдены эффективные технологические рекомендации по улучшению производительности моделирования. На основании проведенных исследований в среде SUMO было найдено оптимальное количество потоков для моделирования транспортной системы. Также разделение на сегменты позволит в будущем заменять один из сегментов дискретной модели на сегмент любой другой модели, что позволит сделать качественный шаг в моделировании транспортных потоков.

Abstract

For 76 pages, 21 figures, 5 tables, 3 appendices.

KEYWORDS: SUMO, DISCRETE MODEL, TRANSPORT FLOW, MULTI-PROCESSOR SYSTEM.

Theme of final qualification work: “The method of interaction of instances of a discrete model of a transport system in a multiprocessor system”

This work is devoted to the study of the separation of a holistic model of the traffic flow into segments, identifying the optimal method and finding the acceptable accuracy of the study. Tasks that were solved during the study:

1. The study of the features of separation into segments of the transport model.
2. Identification of the most common problems during segmentation.
3. Performance research and simulation accuracy analysis.

The simulation model was developed on the basis of the discrete SUMO simulator using the Python 3.6 programming language. In the course of work, many libraries of this development environment were involved.

As a result, the segmentation technology of a holistic traffic flow model was analyzed. Effective technological recommendations for improving simulation performance have been developed and found. Based on the research conducted in SUMO, the optimal number of flows was found for modeling the transport system. Also, the division into segments will allow in the future to replace one of the segments of the discrete model with a segment of any other model, which will make it possible to take a qualitative step in the modeling of traffic flows.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
Глава 1. Подходы к моделированию движения транспортных потоков.....	6
1.1 История развития теории транспортных потоков как научной области.....	6
1.2 Особенности транспортного потока как объекта моделирования.....	8
1.3 Цель моделирования движения транспортных потоков.....	9
1.4 Макроскопические модели транспортного потока.....	13
1.5 Макроскопические модели первого порядка.....	16
1.6 Микроскопические модели транспортного потока.....	18
1.7 Модели следования за лидером.....	21
1.8 Модели оптимальной скорости.....	22
1.9 Модели предотвращения столкновений.....	24
1.10 Психофизические модели.....	29
1.11 Модели смены полосы движения.....	34
1.12 Модель смены полосы движения Гиппса.....	36
Глава 2. Цели исследования и постановка задачи.....	41
Глава 3. Метод распределения транспортного потока дискретной модели на сегменты.....	43
3.1 Создание модели транспортного потока в среде SUMO.....	43
3.2 Выгрузка и отладка модели реального города в среде SUMO.....	55
3.3 Настройка и управление транспортной моделью с помощью TraCI.....	56

Глава 4. Экспериментальное исследование.....	58
2.4 Вычисление оптимальной производительности.....	58
2.5 Вычисление зависимости точности от количества потоков.....	59
Заключение.....	61
Список использованных ...источников.....	62
Приложение 1. Скрипт запуска модели с помощью модуля TraCI.....	64
Приложение 2. Централизованная модель.....	68
Приложение 3. Запуск модели с двух разных клиентов.....	70
Приложение 4. Вывод данных из модели.....	72

Введение

Теория транспортных потоков начала развиваться в 50-х годах XX века. Тогда появились первые макроскопические модели, в которых транспортный поток уподобляется жидкости с мотивацией, и первые модели микроуровня, согласно которым уравнения движения выписываются для каждого автомобиля в отдельности. В последующие годы оба класса моделей были существенно расширены. В настоящее время в мире существуют десятки научных журналов, в которых публикуются материалы на транспортную тематику. Регулярно проводятся крупные конференции по математическому моделированию транспортных потоков. Несмотря на колоссальный объем накопленного научного материала, феномен образования заторных состояний до конца так и не изучен. Более того, не существует моделей, которые достоверно описывали бы все существующие фазы транспортного потока. При этом задача прогнозирования появления и развития заторных ситуаций на дорогах имеет высокую степень актуальности в настоящее время и требует разработки новых моделей автомобильного трафика. Постоянный рост числа автомобилей вынуждает оптимизировать дорожную сеть так, чтобы удовлетворить большую часть потребностей города. Чтобы свести риск инвестиций к минимуму, нужно учесть закономерности развития системы дорог, рассредоточение нагрузки на ее отдельных участках. Потому особое значение принимает моделирование и оптимальное планирование дорожной сети. Различные способы моделирования транспортных потоков призваны решать наиболее распространенные транспортные проблемы. Но также проблемой является не оптимальный расход прикладных ресурсов при моделировании транспортных сетей. А оптимизация выделенных ресурсов на моделирование и точность данного процесса – являются основополагающими в такого рода исследованиях.

ГЛАВА 1. ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ДВИЖЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ

1.1. История развития теории транспортных потоков как научной области

Первоначально теория транспортных потоков была довольно практической дисциплиной, которая решала конкретные транспортные проблемы (такие как изучение и обоснование пропускной способности автомобильных дорог и их перекрестков) и основывалась главным образом на эмпирической информации. В начале 1950-х годов теория транспортных потоков сформировалась как самостоятельное научное направление. Математика зарекомендовала себя как основа для теоретического анализа транспортных процессов, вытеснив эмпирический подход. Идеи из статистики, гидродинамики и т. Д. Стали использоваться для описания транспортных потоков. Этот период характеризуется быстрым прогрессом научной мысли и формированием основных направлений исследований. Лайтхилл М.Дж. (M. Lighthill), Уизем Дж. Б. (Г.Б. Уитхэм) и П. Ричардс (П. Ричардс) в 1955 году предложили первую макроскопическую модель (LWR-модель), в которой транспортный поток рассматривался с точки зрения механики сплошных сред. Они показали, что методы моделирования транспортных процессов в сплошных средах могут использоваться для моделирования ситуаций перегрузки. Это заложило основу для макроскопического подхода к описанию транспортных потоков. В то же время изучение процессов кароллоуинга в лаборатории General Motors положило начало микроскопической теории транспортных потоков. В 1960-х годах, с появлением первых персональных компьютеров, возобновился интерес к изучению транспортных систем. Теория транспортных потоков стала рассматриваться как теоретическая основа функционирования систем управления движением в туннелях и на перекрестках. Впоследствии развитие автоматизированных систем управления движением привело к появлению интеллектуальных

транспортных систем (ИТС), охватывающих все аспекты транспорта. В последующие два десятилетия никаких существенных результатов достигнуто не было, за исключением работ И. Пригожина и Р. Германа. Одной из основных причин застоя в развитии теории транспортных потоков является возвращение ученых, внесших основной вклад в развитие теории, в базовые научные дисциплины, исчерпав возможности применения своих методов для решения транспортных задач. ,

В начале 1990-х интерес исследователей к вопросу моделирования транспортных потоков вновь возродился. Одной из областей исследований было использование статистических подходов физики для моделирования движения транспортных средств. Примером использования этого подхода является модель клеточных автоматов К. Нагеля (K. Nagel) и М. Шрекенберга (M. Schreckenberg). Кроме того, многие традиционные подходы к моделированию транспортных потоков, в частности гидродинамические модели, стали подвергаться сомнению. В результате появилось большое количество моделей, и встал вопрос об их соответствии реальным наблюдениям за состоянием транспортного потока. Независимо от используемого подхода к моделированию, исследователь всегда должен сравнивать свои результаты с реальностью реального мира. Появление различных направлений и подходов к моделированию движения транспортных потоков создало предпосылки для создания платформы для проведения научных дискуссий сообществом ученых. Наиболее значимыми событиями стали ежегодный Международный симпозиум по теории транспорта и дорожного движения, и полугодового трафика, и гранулированного потока (проведенный в Москве в 2011 году).

1.2. Особенности транспортного потока как объекта моделирования

Независимо от подходов к моделированию транспортных потоков, необходимо учитывать, что они имеют ряд функций, которые усложняют их формализацию [1].

Во-первых, это стохастичность транспортных потоков - их свойства позволяют прогнозировать только с определенной вероятностью. Поток трафика проходит по транспортной сети, которая имеет определенные характеристики, которые позволяют более или менее строгое описание, и которые не являются стационарными.

Во-вторых, наблюдается нестабильность транспортных потоков и колебания их характеристик происходят как минимум в три цикла: ежедневно, еженедельно и сезонно.

В-третьих, существует неполная управляемость, суть которой заключается в том, что даже при наличии полной информации о потоках и возможности информирования водителей о необходимых шагах эти требования носят рекомендательный характер. Водитель принимает решение о выборе маршрута или режима вождения с субъективными факторами, которые являются его собственными.

В-четвертых, характеристикой дорожного движения как объекта контроля является сложность и даже невозможность измерения даже базовых характеристик, определяющих качество контроля. Поэтому для оценки диапазона интенсивности движения требуется либо наличие датчиков для транспортных потоков во всех направлениях их движения, либо использование аэрофотоснимков или ручное управление работой.

В-пятых, принципиальная невозможность проведения крупномасштабных полевых экспериментов в области организации дорожного движения. Это невозможность предопределена, во-первых, необходимостью обеспечения безопасности движения, во-вторых, материальными и трудовыми затратами на проведение эксперимента (изменение разметки и дислокации дорожных знаков) и, в-третьих, тем, что серьёзные изменения в комплексной схеме организации движения затрагивают интересы большого количества людей — участников движения. Транспортный поток и комплекс условий, в которых он движется, представляет собой типичный пример сложной системы,

содержащей большое количество взаимно связанных и взаимодействующих между собой элементов. Движение транспортного потока является результатом непрерывного взаимодействия между отдельными элементами системы «водитель – автомобиль – дорога – окружающая среда» (ВАДС) как в пространстве, так и во времени. Особенностью этой системы является функционирование в условиях действия большого количества случайных факторов. Таким образом, трудности формализации процесса движения транспортного потока являются серьезной проблемой обеспечения адекватности моделей транспортного потока.

1.3. Цель моделирования движения транспортных потоков

Целью каждого моделирования является изучение объекта сначала на качественной основе, а затем по мере сбора информации и развития модели на количественном уровне. Целью моделирования трафика является определение и прогнозирование всех параметров работы транспортной сети, таких как интенсивность трафика на всех элементах сети, объемы общественного транспорта, средние скорости, задержки и потери времени и т. Д. Основным инструментом для решения этих проблем - математическое моделирование. Термин математическое моделирование понимается как описание явления посредством математических формул, уравнений и неравенств. Классификацию математических методов моделирования и моделей можно представить в виде таблицы (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Классификация математических моделей и методов

Основание классификации	Классы методов и моделей		
Цели моделирования	Описание процессов и систем	Оценка систем	Оптимизация систем
Принцип моделирования	Кибернетический	Стохастический	
Применяемые критерии оценки и оптимизации	Векторные	Скалярные	
Фактор времени	Статические	Динамические	
Степень абстракции модели	Аналитические	Вычислительные	Имитационные
Учет вероятностных факторов	Детерминированные	Вероятностные (стохастические)	

Модели описания — это разомкнутые модели, предполагающие построение описания объекта или процесса P , содержащего функциональные или алгоритмические связи между входами (m, u) и выходами Y (рис. 1.1).

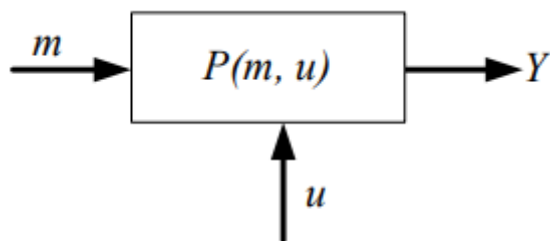


Рис. 1.1. Структура модели описания

Входами являются внешние воздействия на объект (неуправляемые и управляемые), выходами — реакция объекта или процесса. Модели оценки позволяют оценить те или иные состояния комплекса «объект–орган управления–среда». В структуре модели на технологические характеристики связей между входами (m, u) и выходами Y объекта накладывают укрупненные технологические характеристики Co . Для проведения оценки принято использовать целевые функции управляемого объекта (или функции качества состояния) $G=G(m, u)$. Модели оптимизации предполагают

постановку оптимизационной задачи. Например определить такое значение $m \in M$, которое обеспечивает максимум (минимум) $G = G(m, u)$.

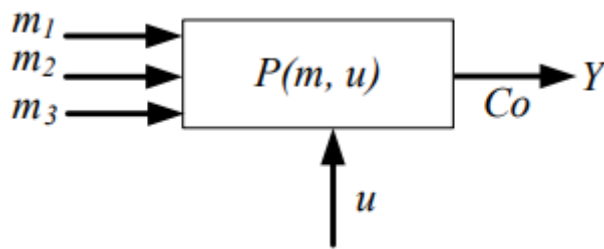


Рис. 1.2. Структура модели оценки

При анализе транспорта и транспортных сетей принято различать три основные группы моделей: прогнозные модели; имитационные модели; модели оптимизации [2]. Прогнозные модели предназначены для моделирования транспортных потоков в сетях с известной геометрией и характеристиками, с известным расположением городских объектов, образующих поток. С их помощью прогнозируются последствия изменения транспортной сети или расположения объектов. Целью прогнозирования нагрузки на транспортную сеть является расчет средних характеристик трафика, таких как объем межрегиональной корреспонденции, распределение участников движения по транспортным маршрутам, определение интенсивности трафика по отдельным участкам. транспортная сеть. Модели этого типа используются для поддержки решений в области градостроительного планирования, для анализа последствий определенных мер для организации транспорта и выбора альтернативных проектов для развития транспортной сети города. Целью симуляции является воспроизведение всех деталей движения и позволяет определить скорость движения, задержки на перекрестках, динамику и длину очередей и другие характеристики движения. Модели этого типа широко используются для улучшения организации движения. Прогнозирующие и имитационные модели дополняют друг друга. Например, прогноз интенсивности трафика служит входом для моделирования работы скоординированной системы управления. Наоборот, улучшение условий движения приводит к перераспределению

транспортных потоков в транспортной сети. Маршрут с лучшими условиями движения привлекает больше трафика. Примечательно, что крупные разработчики систем моделирования трафика объединяют в своих продуктах прогностические и имитационные модели. PTV AG производит два продукта - VISUM и VISSIM. Первый из них решает задачи прогнозирования распределения трафика в сети, а второй выполняет задачи моделирования отдельных элементов. Программа AIMSUN решает те же задачи, что и VISSIM - она имитирует движение транспортных средств в транспортной сети. Опциональный модуль 12 PLANER позволяет рассчитать нагрузку на транспортную сеть, а также программу VISUM. Целью моделей прогнозирования потоков и имитационных моделей является адекватное воспроизведение транспортных потоков. В их основе лежат описательные модели, отличающиеся только степенью детализации транспортной сети. Оценочные модели создаются на основе описательных моделей. Критерии оценки используют экономические (потребление топлива, потеря трафика, пешеходы и пассажиры), окружающую среду (токсичные выбросы и транспортный шум), критерии безопасности (конфликтная нагрузка, ускорение или энергетический шум). Функции для оценки характеристик транспортных сетей доступны в программном комплексе VISUM + VISSIM, а также в программе AIMSUN. Модели оптимизации решают задачи оптимизации маршрутов пассажирских и грузовых перевозок, выбора оптимальной конфигурации сети и расчета оптимальных планов сигналов для работы светофора. При разработке модели оптимизации основной задачей является определение целевой функции и установка пределов. В качестве целевой функции они обычно берут на себя функцию затрат на перемещение и минимизируют ее. Ограничения - это требования безопасности движения или минимальные требования к движению.

1.4. Макроскопические модели транспортного потока

Макроскопические модели транспортного потока воспроизводят агрегированные свойства взаимодействий транспортных средств используя для этого макроскопические переменные: – средняя скорость $v(x,t)$, м/ч; – плотность транспортного потока $\rho(x,t)$ авт/км; – интенсивность движения $q(x,t)$, авт/ч; где x и t представляют соответственно переменные пространства и времени. Плотность транспортного потока $\rho(x,t)$ представляет собой число транспортных средств на единицу длины, то есть является показателем наполнения рассматриваемого сечения связи в определенный момент времени. Относительно микроскопических переменных плотность может быть получена с помощью средней дистанции d и числа автомобилей N_{veh} как:

$$\rho = \frac{N_{veh}}{L} = \frac{N_{veh}}{\sum_{i=1}^{N_{veh}} d_i} = \frac{1}{\bar{d}},$$

где L – длина рассматриваемого сегмента транспортной сети. Интенсивность $q(x,t)$, (или объем движения) являются числом транспортных средств, проходящего через сечение дороги в единицу времени. Относительно микроскопических переменных интенсивность транспортного потока может быть определена как обратная величина среднего времени проезда h . Рассматривая период времени Δt , интенсивность движения может быть выражена как:

$$q = \frac{N_{veh}}{\Delta t} = \frac{N_{veh}}{\sum_{i=1}^{N_{veh}} h_i} = \frac{1}{\bar{h}}.$$

Средняя скорость $v(x,t)$, может быть определена как средняя временная и пространственная скорость:

– средняя временная скорость это среднее арифметическое скоростей транспортных средств, которые проходят сечение во время определенного

периода;

– пространственная средняя скорость это среднее арифметическое скоростей транспортных средств, которые присутствуют в сегменте дороги в определенное время.

Модели данного типа были разработаны, для математической интерпретации зависимости между скоростью, плотностью и интенсивностью транспортного потока:

$$q(x,t) = v(x,t) \cdot \rho(x,t);$$
$$v(x,t) = f(q(x,t), \rho(x,t)),$$

где $f(\cdot)$ – некоторая функция.

Зависимость интенсивности движения q от плотности транспортного потока ρ принято называть фундаментальной (или основной) диаграммой транспортного потока (рис. 1.2) [3]. Левая часть кривой (показана сплошной линией) отражает устойчивое состояние потока, при котором по мере увеличения плотности транспортный поток проходит фазы свободного, затем частично связанного и наконец связанного движения, достигая точки максимально возможной интенсивности, т.е. пропускной способности (точка $q_{\max} = P_a$).

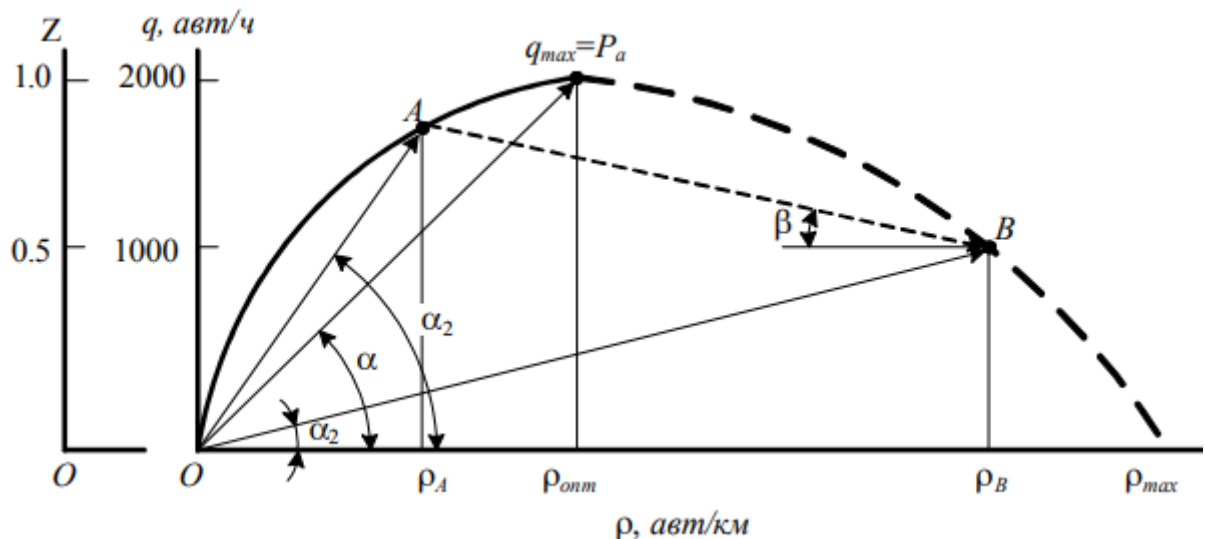


Рис. 1.2

В процессе этих изменений скорость потока падает – она характеризуется тангенсом угла наклона α радиус-вектора, проведенного от точки O к любой точке кривой, характеризующей изменение q . Соответствующие точке $q_{\max} = P_a$ значения плотности и скорости потока считаются оптимальными по пропускной способности ($\rho_{\text{опт}}$ и $v_{\text{опт}}$). При дальнейшем росте плотности (за точкой ρ_A перегиба кривой) поток становится неустойчивым (эта ветвь кривой показана прерывистой линией). Переход потока в неустойчивое состояние происходит вследствие несинхронности действий водителей для поддержания дистанции безопасности (действия «торможение–разгон») на любом участке пути и особенно проявляется при неблагоприятных погодных условиях. Все это создает «пульсирующий» (неустойчивый) поток. В точках O и ρ_{\max} интенсивность движения $q = 0$, т. е. соответственно на дороге нет транспортных средств или поток находится в состоянии затора (неподвижности). При изменении состояния покрытия, условий видимости для водителей, состава потока, вертикального и горизонтального профилей дороги изменяется характер диаграммы. Основная диаграмма транспортного потока может быть построена и в других координатах, например $v - \rho$ и $q - v$ (рис. 2.2–2.3).

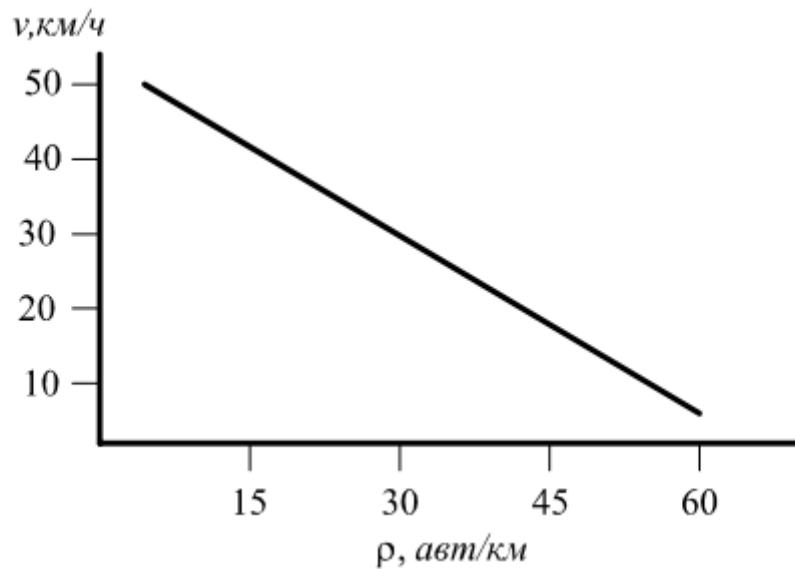


Рис. 1.3

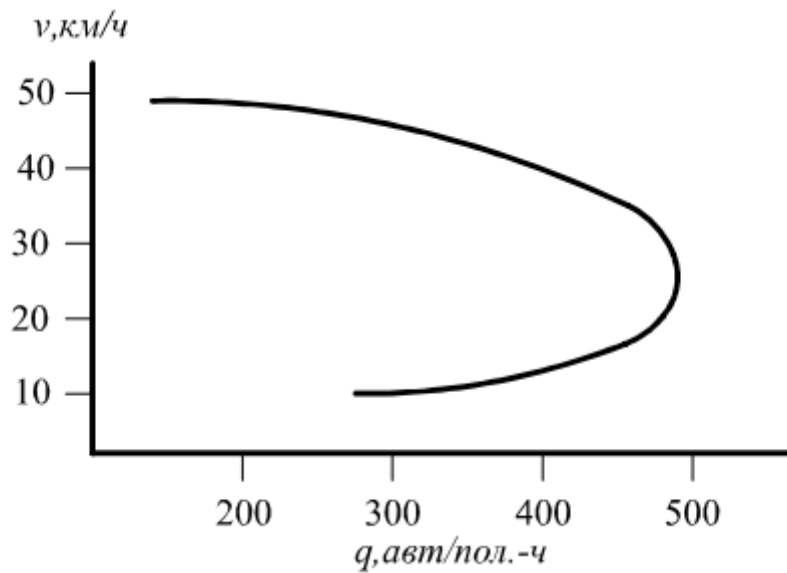


Рис. 1.4

1.5. Макроскопические модели первого порядка

Транспортный поток можно рассматривать как поток одномерной сжимаемой жидкости, допуская, что поток сохраняется и существует взаимно-однозначная зависимость между скоростью и плотностью транспортного потока. Первое допущение выражается уравнением неразрывности, второе – функциональной зависимостью между скоростью и

плотностью для учета уменьшения скорости движения автомобилей с ростом плотности потока. Плотность автомобилей $\rho(x, t)$, $x \in \mathbb{R}$ в момент времени $t \geq 0$. Число автомобилей в интервале (x_1, x_2) в момент времени t равно:

$$\int_{x_1}^{x_2} \rho(x, t) dx.$$

Пусть $v(x, t)$ – скорость автомобилей в точке x в момент t . Число проходящих через x автомобилей в момент t , есть $\rho(x, t) v(x, t)$. Основным законом состояния масс, что автомобиль ни не может быть создан, ни потерян в транспортной сети, что и приводит к уравнению непрерывности в виде:

$$\frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0,$$

где $\frac{\partial q}{\partial x}$ и $\frac{\partial \rho}{\partial t}$ – частные производные относительно времени t и положения x рассматриваемого сечения дороги.

Уравнение изменения плотности транспортного потока принимает вид:

$$\rho_t + (\rho \cdot v)_x = 0,$$

$$\rho(x, 0) = \rho_0(x).$$

Рассматривая поток транспорта на однополосной дороге при движении без обгонов Б.Д. Грешшилдс [4] получил уравнение скорости движения транспортного потока исходя из следующих предположений:

- v зависит только от плотности ρ ;
- если дорога пуста ($\rho = 0$), автомобили едут с максимальной скоростью $v=v_{\max}$;
- при наполнении дороги, скорость падает вплоть до полной остановки ($v=0$), когда машины расположены «бампер-к-бамперу» ($\rho=\rho_{\max}$).

Модель скорости выражается следующим линейным соотношением:

$$v(\rho) = v_{\max} \rho \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{\max}} \right), \quad 0 \leq \rho \leq \rho_{\max}.$$

Закон сохранения количества автомобилей при этом имеет вид:

$$\rho_t + \left[v_{\max} \rho \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{\max}} \right) \right]_x = 0.$$

где v – средняя скорость; $\max v$ – скорость свободного движения; ρ – плотность; ρ_{\max} – плотность насыщения.

Скорость свободного потока – это максимальная средняя скорость, с которой транспортные средства могут двигаться, в то время как плотность насыщения – максимальная плотность при насыщении потока. Модель Грешилдса предполагает, что средняя скорость уменьшается линейно с увеличением плотности, однако данная гипотеза не получила должного подтверждения на практике. Грешилдс Х. [5] предложил нелинейную модель для насыщенного потока в форме логарифмической зависимости:

$$v(\rho) = v_{\max} \ln \left(\frac{\rho_{\max}}{\rho} \right).$$

Модель показала хорошую корреляцию между модельными и полевыми данными.

1.6. Микроскопические модели транспортного потока

Поведение водителей и характер ускорения в режиме следования за лидером широко изучалось с 1950-х. Данные модели оперируют такими микроскопическими данными, как скорость ведомого автомобиля и его лидера, дистанция между ними, ускорение ведомого автомобиля. Однако в те годы оценка параметров модели не получила должного внимания, в большинстве случаев использовался метод простого корреляционного

анализа. Исследователи начали обращать внимание на поведение водителей при ускорении в режиме свободного потока в начале 1980-ых. В это время появляется такой важный инструмент в изучении транспортных потоков, поведения водителей, разработке и оценке различных стратегий управления и менеджмента в дорожном движении, как микроскопическое моделирование. Для различных сценариев движения микроскопические модели определяют поведение транспортного потока, описывая на основе взаимодействие между отдельными транспортными средствами. При этом принято для описания пространства состояния модели использовать следующие переменные:

- n – номер транспортного средства;
- x_n , v_n , a_n , L_n – продольная позиция, скорость, ускорение, и длина транспортного средства i ;
- δ_n – расстояние между транспортным средством n и $n + 1$ (в группе),
- h_n – время движения для транспортного средства n ;
- s_n – положение транспортного средства n ;
- τ_n – время реакции водителя транспортного средства n .

Взаимосвязь этих переменных проиллюстрированы, на примере движения двух транспортных средства n и $n+1$, движущиеся по одной полосе движения в системе координат время-пространство (рис. 1.5). Предполагается, что длина транспортного средства L_n является расстоянием от заднего до переднего бампера автомобиля. Расстояние между передним бампером ведущего автомобиля и задним бампером ведущего расстоянием называют дистанцией следования δ_n . Время движения h_n транспортного средства определено как разница во времени между прохождением задних бамперов обоих транспортных средств в определенном положении. Предположим, что скорости автомобилей являются постоянной величиной, тогда время движения – количество времени, необходимое для транспортного средства n , чтобы достигнуть текущей позиции транспортного средства $n+1$. Дистанция автомобиля определяется как расстояние между задним бампером автомобиля – лидера и 30 передним

бампером ведомого автомобиля во время t . Положение s_n равно сумме L_n длины автомобиля и дистанции следования $n \delta$.

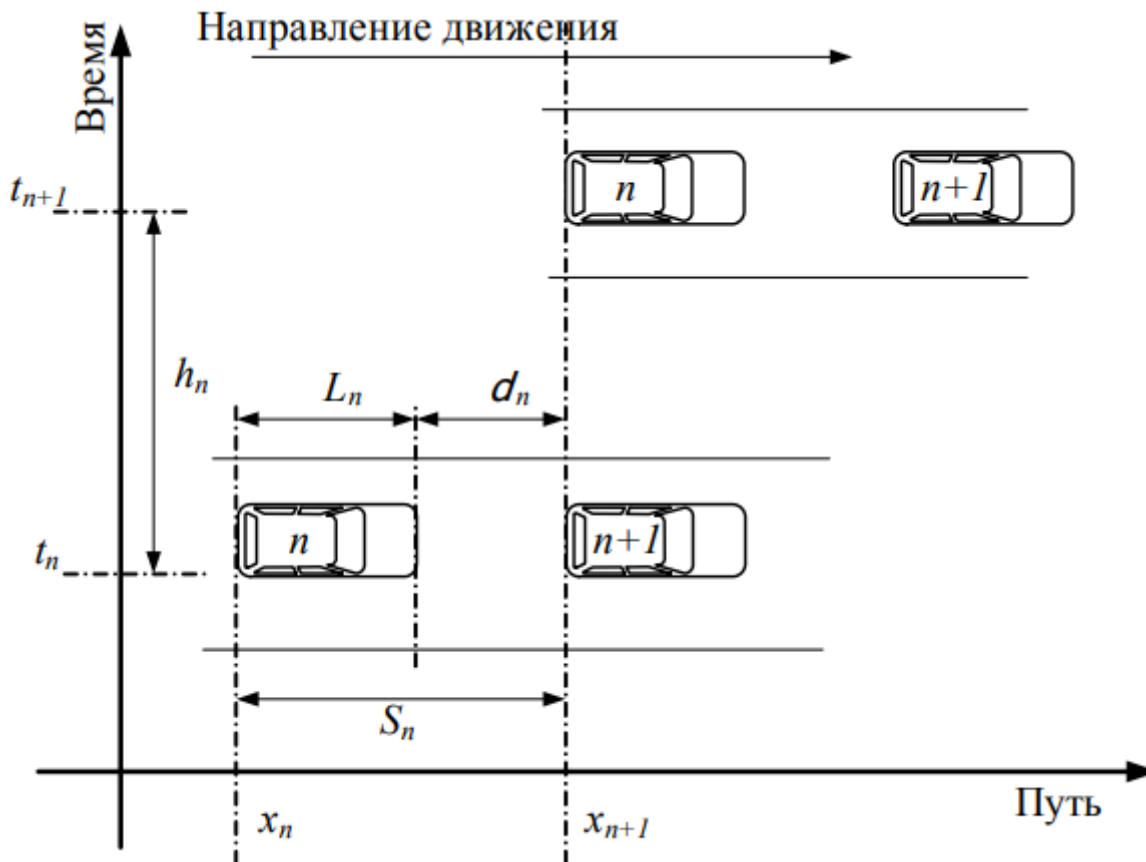


Рис. 1.5

Чаще всего рассматривают движение в переменных времени, а не пространственное движения. Исследование движения в переменных времени более доступно в части возможности проведения измерений. Для исследований движения в переменных расстояния, как правило, требуется использования аэрофотосъемки. Те же самые данные могут быть получены при изучении движения в переменных времени и индивидуальных измерений скорости в цифровой форме следующим образом:

$$s_n \approx h_n \cdot \dot{x}_{n+1};$$

где \dot{x}_{n+1} – производная продольной позиции или v_{n+1} .

Микроскопические модели определяют состояние транспортного потока, описывая индивидуальные задачи водителя в различных сценариях движения. Задачами водителя являются: поддержание желаемого управления, изменение скорости, принятие решений по управлению и т.д., которые должны быть выполнены для достижения пункта назначения. Вообще, задачу вождения можно разделить на следующие подзадачи:

- навигацию (стратегический уровень);
- вождение (тактический уровень);
- управление (эксплуатационный уровень).

Стратегический навигационный уровень включает задачи, такие как планирование маршрута и движение по маршруту. Водители выбирают цель поездки, направление движения и дороги в зависимости от состояний потока и специфических целей. На уровне вождения задачи водителя главным образом содержат действия, которые помогают в поддержании безопасной скорости и надлежащей траектории относительно дороги. На данном уровне принимаются все решения, связанные с вождением автомобиля в соответствии с текущим состоянием транспортного потока. Водитель выполняет действия, связанные с движением, как в продольном направлении, так и в поперечном (смена полос движения). Уровень управления включает задачи водителя, которые контролируют позицию автомобиля в продольном и боковом направлении относительно препятствий.

1.7. Модели следования за лидером

Задача движения в продольном направлении включает в себя действия по достижению необходимой скорости и поддержанию безопасного расстояния между автомобилями. Решение сменить полосу движения и интервал между следующими транспортными средствами в соседней полосе движения для выполнения маневра смены полосы движения является задачей бокового движения. Обе задачи могут быть описаны в терминах условий окружающей

среды транспортного потока или в отношении других транспортных средств в транспортном потоке. Продольное поведение водителя можно классифицировать следующим образом:

- поведение в условиях свободного потока;
- поведение после лидера;
- поведение в условиях остановки
- движение.

В условиях свободного потока плотность очень мала, а среднее расстояние перемещения велико. Таким образом, транспортные средства могут двигаться с желаемой скоростью. Поскольку плотность начинает расти из-за растущего спроса, транспортные средства начинают перемещаться на большие расстояния, чтобы максимизировать пропускную способность полосы движения. Отдельные транспортные средства вынуждены следовать друг за другом на пониженной скорости. Как только достигается критическая плотность (при которой максимальная пропускная способность полосы движения используется), движение транспортных средств переключается в режим остановки. Такое поведение потока трафика соответствует правой стороне основной блок-схемы.

Микроскопические модели, описывающие задачу продольного движения, можно классифицировать:

- модели реагирования на стимулы;
- модели предотвращения столкновений;
- психофизические модели

1.8. Модели оптимальной скорости

Нецелл Г. предложил модель, в которой постулируется, что для каждого водителя существует «безопасная или оптимальная скорость» движения, зависящая от дистанции до лидера [7]:

$$v_n(t + \tau) = V\left(\frac{1}{\delta_n(t)}\right).$$

Данная скорость также называется оптимальной скоростью. В этих моделях вместо адаптации скорости ведомого автомобиля к скорости лидера предполагается адаптация к оптимальной скорости. Влияние лидера косвенно выражено через зависимость оптимальной скорости от дистанции до лидера. При этом предполагается, что водитель ведомого автомобиля будет сохранять максимально возможную скорость до тех пор, пока будет оставаться резерв расстояния до лидера, и водитель будет выбирать оптимальную скорость в зависимости от расстояния до лидера, когда дистанция станет меньше этого резерва.

Дальнейшее развитие идеи «оптимальной» скорости получило в работе М. Бандо [8]. Была предложена следующую формулировку модели:

$$a_n(t) = \alpha(V(\delta_n) - v_n),$$

Трайбер М. [24] предложил модель, известную как модель «разумного водителя» (Intelligent Driver Model – IDM). Ускорение автомобиля определяется по следующей формуле:

$$a_n(t) = a \cdot \left(1 - \left(\frac{v_n(t)}{v_0} \right)^\delta - \left(\frac{s^*(v_n(t), v_n(t) - v_{n+1}(t))}{s_n(t)} \right)^2 \right),$$

где a – максимальное ускорение; v_0 – желаемая скорость в свободных условиях; $s^*(.)$ – «желательная минимальная дистанция», определяемая как:

$$s^*(v_n(t), v_n(t) - v_{n+1}(t)) = s_0 + v_n(t)T + \frac{v_n(t) \cdot (v_n(t) - v_{n+1}(t))}{2\sqrt{ab}},$$

где s_0 – минимальная дистанция; T – желательная временная дистанция; b – комфортное замедление.

Слагаемое $\dot{v}_{free}(v) = a \cdot \left(\frac{v_n(t)}{v_0} \right)^\delta$ описывает стратегию достижения водителем желаемой скорости v_0 в свободных условиях, а $\dot{v}_{brake}(v) = a \cdot \left(\frac{s^*(v_n(t), v_n(t) - v_{n+1}(t))}{s_n(t)} \right)^2$ – взаимодействие с лидером.

Если расстояние до лидера $s_n(t)$ большое, то член взаимодействия $\dot{v}_{brake}(v)$ не значителен, и модель ускорения IDM сводится к уравнению достижения желательной скорости $\dot{v}_{free}(v)$, которое является убывающей функцией скорости и принимающее значения в диапазоне от $\dot{v}(0) = a$ до $\dot{v}(v_0) = 0$

Для более плотного транспортного потока слагаемое замедления $\dot{v}_{brake}(v)$ становится значимым в зависимости от соотношения между эффективной «желательной минимальной дистанцией» $s^*(\cdot)$ и текущей дистанцией $s_n(t)$.

Параметры IDM модели для различных классов вождения

Параметр модели	Нормальное	Робкое	Агрессивное	Грузовик
Желательная скорость v_0 , км/ч	120	100	140	85
Желательная временная дистанция T , с	1,5	1,8	1,0	2,0
Минимальная дистанция s_0 , м	2,0	4,0	1,0	4,0
Максимальное ускорение a , м/с ²	1,4	1,0	2,0	0,7
Комфортное замедление b , м/с ²	2,0	1,0	3,0	2,0

Таблица 1.2

1.9. Модели предотвращения столкновений

Модели предотвращения столкновений или модели безопасной дистанции – другой подход к моделям следования за лидером.

Первая модель безопасной дистанции была предложена Е. Кометани и Т. Сасаки [9]. Мо- 38 дель описывает безопасную дистанцию следования между автомобилями, при которой можно было бы избежать столкновения:

$$\Delta x_i(t+\tau) = \alpha \dot{x}_{i+1}^2(t+\tau) + \beta_1 \dot{x}_i^2(t+\tau) + \beta_1 \dot{x}_i^2(t+\tau) + b_0.$$

Пипес Л. предложил, что «хорошее правило для поддержания безопасного расстояния для ведомого автомобиля состоит в том, чтобы включить расстояние до лидера» [10]. В конце 1970-х П. Гиппс [11] предложил модель следования за лидером, получившую достаточно широкую известность (в том числе используется в программе микроскопического моделирования Aimsun). Она базируется на оценке поведения водителя и ожидаемом поведении автомобилей в транспортном потоке. На поведение водителя и параметры автомобиля накладываются ограничения, обеспечивающие воспроизведение особенностей следования за ведущим автомобилем в транспортном потоке с учетом обеспечения безопасности. Модель состоит из двух компонентов – ускорения и замедления. Первый компонент представляет собой намерение автомобиля достигнуть определенной желательной скорости, в то время как второй – воспроизводит ограничения, накладываемые лидирующим автомобилем, не позволяя водителю достигнуть желаемой скорости. Модель определяет максимальную скорость автомобиля (n), который может ускориться в периода времени $(t, t+\tau)$ следующим образом:

$$v_a(n, t+\tau) = v(n, t) + 2.5 \cdot a(n) \cdot \tau \cdot \left(1 - \frac{v(n, t)}{V^*(n)} \right) \sqrt{0.025 + \frac{v(n, t)}{V^*(n)}},$$

С другой стороны, максимальная скорость, которую тот же самый автомобиль (n) может достичь согласно его индивидуальным особенностям и ограничениям, наложенным присутствием лидирующего автомобиля (n+1):

$$v_b(n, t + \tau) = d(n) \cdot \tau + \sqrt{d(n)^2 \cdot \tau^2 - d(n) \left[2 \cdot \delta(n, n+1) - v(n, t) \cdot \tau - \frac{v(n+1, t)^2}{d'(n+1)} \right]}$$

Скорость автомобиля n во временном интервале (t, t+τ) является минимумом выражений (3.14) и (3.15):

$$v(n, t + \tau) = \min \{ v_a(n, t + \tau), v_b(n, t + \tau) \}.$$

Положение автомобиля n в текущий момент будет определяться по формуле:

$$x(n, t + \tau) = x(n, t) + v(n, t + \tau) \cdot \tau.$$

Модель следования такова, что лидирующий автомобиль, то есть автомобиль, движущийся свободно без влияния лидера на его поведение, стремиться двигаться с максимальной желаемой скоростью. Для вычисления максимальной желательной скорости автомобиля используется три параметра:

1. максимальная желательная скорость автомобиля $v_{n \max}()$;
2. принятие скорости автомобилем $\theta() n$;
3. ограничение скорости на транспортной связи i или повороте $S_i \text{ limit}()$.

Ограничение скорости автомобиля n на транспортной связи i вычисляется по формуле:

$$s(n, i) = S_{\text{limit}}(i) \cdot \theta(n).$$

Максимальная желательная скорость автомобиля n на связи i определяется как:

$$V^*(n, i) = \min [s(n, i), v_{\max}(n)].$$

Модель С. Краусса [12] основана на наличии безопасного интервала между ведомым транспортным средством и лидером, необходимым для безопасной остановки. Используя приближенную формулу для тормозного пути $d(v) = v^2 / 2b$, учитывая максимальное замедление взаимодействующих транспортных средств (предполагается, что замедления равны) и время реакции водителя ведомого автомобиля, можно получить следующую зависимость для определения безопасной скорости.

$$v_{safe}(t) = -\tau \cdot b + \sqrt{(\tau \cdot b)^2 + v_{leader}(t-1)^2 + 2 \cdot b \cdot g_{leader}(t-1)},$$

Модель учитывает расстояние до лидера, его скорость и гарантирует движение без столкновения. Для того, чтобы гарантировать адекватные значения ускорения и скорости необходимо наложить ограничения на значения «желаемой» скорости:

$$v_{des}(t) = \min\{v_{safe}(t), v(t-1) + a, v_{max}\},$$

где $v_{des}(t)$ – желаемая скорость (м/с); $v(t)$ – текущая скорость (м/с); a – максимальное ускорение (м/с²); v_{max} – максимальная скорость автомобиля, м/с.

Одним из основных преимуществ модели Краусса является предположение, что водитель не собирается развивать желаемую скорость. Фактическая скорость на самом деле несколько меньше желаемой, и это добавляет важные особенности в поведении модели. Например, такое случайное отличие от желаемой (оптимальной) скорости приводит к спонтанному образованию заторов и медленному старту автомобилей, характерному для реальных водителей. Модель реализует эту особенность поведения водителей стохастическим замедлением. Для этого на очередном шаге моделирования скорость транспортного средства вычисляется как:

$$v(t) = \max\{0, v_{des}(t) - r \cdot a \cdot \epsilon\},$$

где r – случайное число между 0 и 1; ϵ – индивидуальность (несовершенство) водителя автомобиля, принимающее значение между 0 и 1; $v(t)$ – конечная (финальная) скорость автомобиля в момент времени t , м/с.

При разработке программы SUMO в исходную модель Краусса были внесены два изменения. Первое заключается в использовании линейной функции ускорения, обеспечивающей его уменьшение с ростом скорости:

$$a(v) = a \left(1 - \frac{v}{v_{\max}} \right).$$

Второе изменение заключается в уменьшении индивидуальности (несовершенства) водителей при разгоне на малых скоростях:

$$v(t) = \max \{ 0, v_{dawdle, new}(t) \},$$

где

$$v_{dawdle, new}(t) = \begin{cases} v_{des}(t) \cdot \varepsilon \cdot r & \text{если } v_{des}(t) < a(v_{des}(t)) \\ v_{veh}(t) - \varepsilon \cdot r \cdot a(v_{des}(t)) & \text{иначе} \end{cases}.$$

Модель Краусса оказалась достаточно быстрой в исполнении вследствие малого количества вычислений, и достаточно реалистичной в сравнении с другими моделями. Использование индивидуальности (несовершенства) водителей нашло признание в качестве дополнения к психофизической модели Видеманна.

1.10. Психофизические модели

Поведенческая модель отслеживания лидерства ГМ имеет два недостатка. Во-первых, водители не следуют за своими водителями на большие расстояния между автомобилями, а во-вторых, водители не ощущают небольших изменений относительных скоростей и поэтому не реагируют на эти изменения. Михаэлис Р. [13] предложил концепцию, согласно которой водитель распознает изменения видимого размера ведущего транспортного средства, так что если он приближается к этому автомобилю на более низкой скорости. Относительная скорость воспринимается при изменении угловых размеров направляющей, водитель должен распознавать даже минимальные изменения в конечном времени. Эксперименты показали наличие

определенных порогов у водителей управляемых автомобилей при принятии решения о восприятии относительной скорости и расстояния от ведущего транспортного средства. Способность воспринимать относительную скорость и оценивать расстояние зависит от агрегата водителя, а также от требуемой скорости и безопасного расстояния. Из-за сочетания психологических аспектов и физиологических ограничений восприятия водителями эту модель называют психофизической моделью следования за лидером или моделью точек действия (модели точек действия). В психофизических моделях термин «порог восприятия» используется для определения порога относительной скорости, который является функцией расстояния. Порог меньше на небольших расстояниях и постепенно увеличивается с увеличением.

Водитель реагирует на ошибку относительной скорости с водителем, только если ошибка превышает порог восприятия. В какой-то момент расстояние настолько велико, что порог восприятия становится бесконечным, то есть водитель больше не ведет лидера. Важным следствием психофизических моделей является то, что порог восприятия отрицательной относительной скорости ниже, чем положительной относительной скорости. Это означает, что влияние расстояния и относительной скорости проводника на ускорение и замедление проводников различно. Самой известной моделью был Р.

Видеманн из-за ее использования в программе микроскопического моделирования Vissim. Основная идея модели - предположить, что водитель может поддерживать один из четырех режимов вождения:

Свободное движение: нет эффекта до вождения автомобиля. В этом режиме водитель пытается достичь и поддерживать желаемую скорость индивидуально. Фактически, скорость в свободном движении не может быть постоянной, колеблющейся вокруг необходимой скорости из-за несовершенства систем рулевого управления транспортного средства.

Подход: процесс адаптации собственной скорости водителя к более низкой начальной скорости. При приближении водитель тормозит, так что разница в

скорости между двумя транспортными средствами равна нулю при достижении требуемого безопасного расстояния.

Следуйте: водитель следует за гидом без осознанного ускорения или замедления. Он сохраняет безопасное расстояние более или менее постоянным. Из-за несовершенства систем рулевого управления транспортного средства и несовершенной оценки ситуации водителя относительная скорость составляет около нуля.

Торможение: от небольшого до высокого замедления, если безопасное расстояние меньше требуемого. Это может произойти, если водитель внезапно меняет скорость, например, когда другой автомобиль меняет полосу движения. Для каждого режима вождения определяются зависимости ускорения от скорости, относительной скорости, расстояния и индивидуальных характеристик водителя и транспортного средства (рисунок 1.6). Как только установленный порог достигнут, водитель переключается с одного режима на другой, что может быть выражено как сочетание относительной скорости и расстояния. Например, маленькая относительная скорость может только быть воспринята на малой дистанции, тогда как большая относительная скорость вынуждает приближающихся водителей к более ранней реакции.

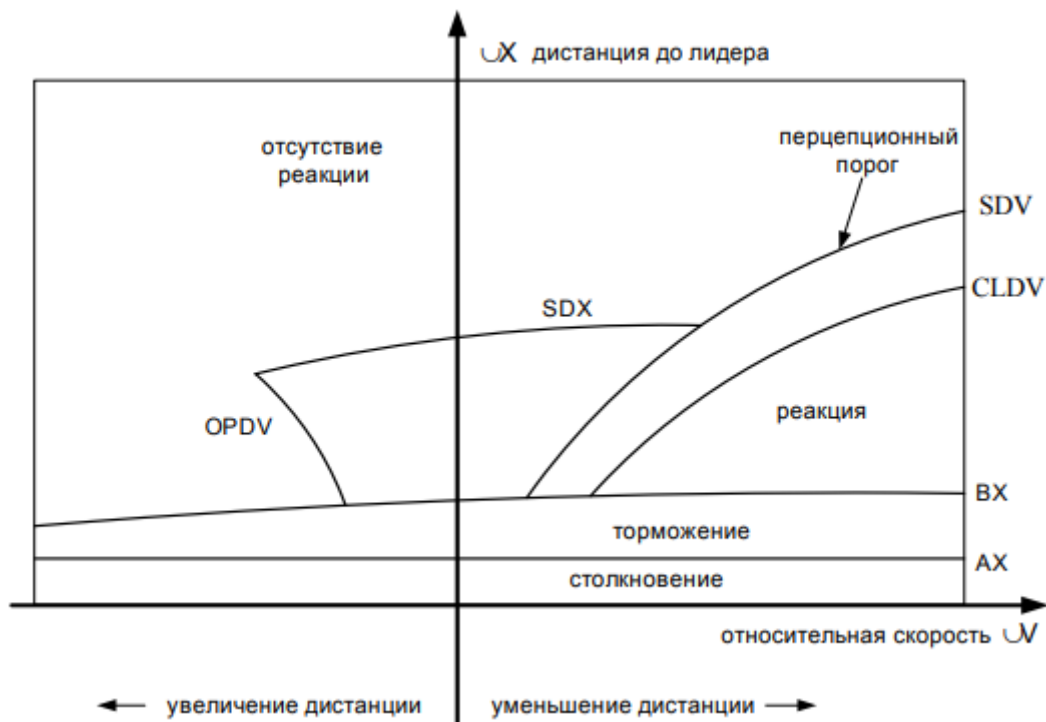


Рис. 1.6. Модель Видеманна 74

Психофизическая модель движения Видеманна [14] используется для моделирования движения в городских условиях и содержит следующие параметры: – среднее расстояние бездействия (AX), определяемое как среднее желательное расстояния между остановившимися автомобилями – желательная минимальная дистанция следования за лидером ABX является функцией от AX , изменения дистанции безопасности BX и скорости. В модели желательная дистанция автомобиля вместо единственного значения, которое имело место в ранее упомянутых моделях, находится в интервале ($ABX \leq s \leq SDX$). Учитывая, что в установившемся режиме следования $0 \leq \Delta \approx v$, только граница желательной дистанции (ABX и SDX) определяют характеристики установившегося режима следования автомобиля. Ожидаемое значение ABX и параметров SDX могут быть вычислены как:

$$\begin{aligned}
AX &= s_i + AX_{add} + AX_{mult} \cdot z_n, \\
ABX &= AX + BX \sqrt{v}, \\
ABX &= AX + BX \sqrt{v}, \\
SDX &= s_i + BX \cdot EX \cdot \sqrt{v}.
\end{aligned}$$

где BX и EX случайные переменные, вычисляемые как:

$$\begin{aligned}
BX &= BX_add + BX_mult \cdot z_n, \\
EX &= EX_add + BX_mult \cdot (z - z'_n);
\end{aligned}$$

С учетом принятых обозначений скорость движения принимает вид:

$$v_n(t + \tau) = \min \left\{ \begin{aligned} &3.6 \cdot \left(\frac{s_n(t) - AX}{BX} \right)^2 \\ &3.6 \cdot \left(\frac{s_n(t) - AX}{BX - EX} \right)^2, v_{free} \end{aligned} \right\}.$$

Для моделирования движения по автомагистралям разработана модель

Видеманна 99. Модель, определяет скорость автомобиля как минимум по двум значениям скорости: первое основано на ограничениях ускорения автомобиля; второе – на модели установившегося режима следования.

Модель рассматривает кинематику автомобиля как линейную зависимость скорость – ускорение:

$$v_n(t + \tau) = \min \left\{ \begin{aligned} &v_n(t) + 3.6 \cdot \left(CC8 + \frac{CC8 - CC9}{80} v_n(t) \right) \tau \\ &3.6 \frac{s_n(t) - CC0 - L_{n-1}}{v_n(t)}, v_{free} \end{aligned} \right\},$$

где $CC8$ – максимальное ускорение автомобиля при скорости от 0 км/ч (м/с 2); $CC9$ – максимальное ускорение автомобиля при скорости от 80 км/ч.

Модели следования за автомобилем является только одной составной частью моделирования продольного движения транспортных средств. Каждое транспортное средство должно учитывать инфраструктуру перед ним.

Прежде чем въехать на дорогу необходимо оценить разрешенную максимальную скорость на данном участке. Для обеспечения безаварийного

поведения в сетях со сложной инфраструктурой, быть выполнены следующие вычисления:

- адаптация скорости в зависимости от скорости лидера и расстояния до него (в пределах ближайших полос);
- адаптация к разрешенной скорости на следующей полосе движения;
- если автомобиль не имеет права приоритетного проезда на следующем перекрестке, необходимо вычислить две скорости
- одна для свободного проезда перекрестка, и вторую
- основанную на предположении, что транспортное средство должно будет затормозить и остановиться перед перекрестком.

1.11. Модели смены полосы движения

В этом случае необходимо рассмотреть процесс принятия решений в последовательности из трех этапов:

- принятие решения об изменении положения лифта;
- подбор всей лифтовой штанги;
- принятие интервала маневрирования.

Модели принятия решений по изменению положения лифта. В 1980-х годах цыгане представили модель, в которой было возможно максимально решить изменение положения выставки. Эта модель предполагает, что любое изменение может быть только в том случае, если в интервале есть интервал. Это предложение может быть принято всякий раз, когда требуется положение подъемного устройства. И если этот интервал должен быть изменен по ширине, то и безопасный интервал будет меньше необходимого,

например, в условиях насыщенного движения, чтобы это допущено недопустимо.

Lidas P .. Если полоса движения изменяется, то без смены полосы движения.

Подход аналогичных моделей П. Лидера был подвергнут работе Дж.Дж.

Лонга и Л.Н. Коцолопулос [17]. Модель классифицирует решение изменения положения как регулируемое или контролируемое. Решение о

корректирующем изменении положения движения принимается, когда скорость транспортного средства в прямом направлении ниже необходимой.

Обязательное решение о смене полос движения, когда автомобиль хочет объехать препятствие, находится в движении. Д. Связь между моделями Р.

Hydas и Y. Young, в которых используются функции устройства, заменяется указанными именами. Модели определяют надежность приоритета

транспортного средства, что необходимо в смещенном смысле. В рамках этой функции водитель участвует в последней позиции лифта, которая

обеспечивает установку. Скорость перемещения устройства по всему полюсу элеватора основана на использовании модели. Т. Толковая модель, которая

позволяет водителю выбирать целую полосу и приемлемый интервал [18], не обязательно должна быть соседней. Достаточно полноразмерных столбов со

средним интервалом, водитель сможет их хранить, забудьте об этом. Модель использует ряд логических уровней для определения привлекательности

каждой позиции лифта. Привлекательная позиция движения характеризуется улучшением потребности водителя в безопасности индикатора, а также

наклона. Д. Изменение диапазона возможно только в том случае, если указанный интервал имеет интервал, превышающий или равный

необходимому для завершения маневра.

Интервал приема моделей. Решение состоит в том, чтобы изменить

положение лифта, водитель должен выбрать момент маневрирования. Он

предлагает свой интерфейс для каждого гражданина. Интервалы между

автомобилем в соседней полосе движения, которые меньше критических

отклонений, и интервалы, превышающие 46 критических, принимаются водителями, и полоса движения достигает. Различные проводы оценивают и принимают интерфейс. Кроме того, водители могут ориентироваться друг на друга в обеих ситуациях. Этот неравномерный диск водителя имеет тенденцию распределяться по стехиктически. Основная гипотеза законов христианских интервалов была представлена во многих различных моделях. Герман Р., Вайс Г.Х. [19] предоставили модель, которая предлагает разделение критических вмешательств экспертным бюро. Компания [20] использовала логическое распределение в своей собственной модели. При отсутствии таких моделей этот факт не учитывался, что не учитывалось. В 1960 г. Г.Я. Вайс и А. Марадудин [21] работали с функцией α (tgar), которая описывает надежность той, которую выбрал водитель. Эта функция проста, если водитель уже отвечает, является одним из них или закрыт. Даганзо [22] предоставил модель опалубки, которая была бы признательна за принятие мер для каждого отдела. Эта модель использует всю историю переадресованных и полученных разговоров.

1.12. Модель смены полосы движения Гиппса

Модель П. Джиппа [23] является первой моделью, которая использует правило в качестве основы. Модель хорошо документирована и широко используется в коммерческих программах микроскопического моделирования.

Изменение полосы движения в Gірps может быть выражено в виде дерева решений с рядом постоянных условий, в которых представлены ситуации, с которыми вы можете столкнуться на дороге. Необходимость смены полосы движения - это событие, которое запускается правилом и в конечном итоге представляет двоичную опцию (изменение или изменение полосы движения).

Причины смены полосы движения в Гиппах следующие:

- избегать препятствий;
- обход специальных полос (например, зарезервированных полос для общественного транспорта);
- сделать изгиб на перекрестке;
- объехать тихоходную машину;
- достижение необходимой скорости.

Водитель находится на соседней полосе движения, чтобы рассчитать приемлемое расстояние между рассматриваемым транспортным средством и парой, а следующая модель водителя используется для определения необходимого замедления или ускорения. Предполагается, что водитель ведомого транспортного средства выбирает скорость, чтобы гарантировать безопасную остановку в случае внезапной остановки водителем. Таким образом, расчет замедления транспортного средства используется для оценки возможности смены полосы движения.

Данное транспортное средство оценивает свое собственное замедление и замедление управляемого транспортного средства в целевой полосе движения в случае маневра (рис. 1.7), из которого определяется максимальное замедление для данного маневра смены полосы движения. Если замедление выходит за пределы допустимого диапазона, полосы движения с этим транспортным средством не изменятся.

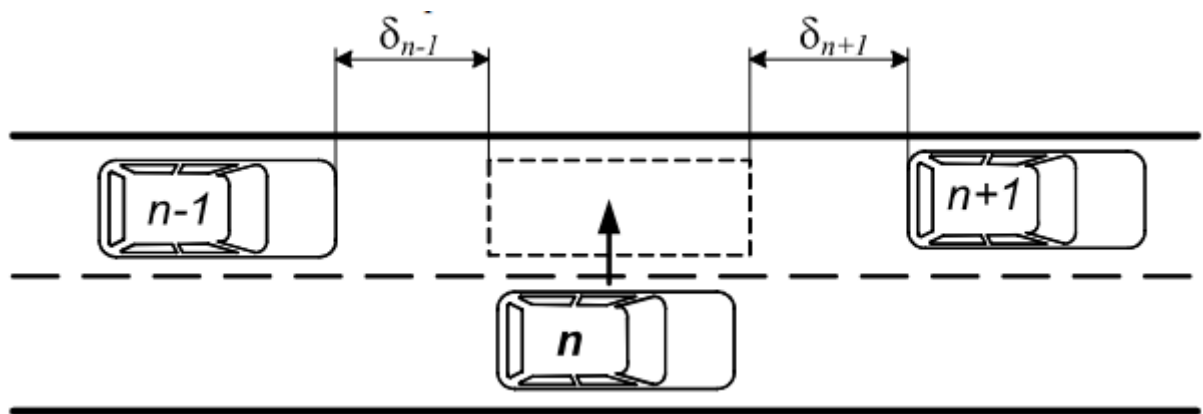


Рис. 1.7. Схема смены полосы движения

Уравнение модели замедления выглядит следующим образом:

$$b_n = \left[2 - \frac{(D_n - x_n(t))}{10 \cdot V_n} \right] b_n^*,$$

где b_n – отдельная норма замедления, полученная для данного маневра смены полосы движения; $(D_n - x_n(t))$ – расстояние между текущим положением автомобилем и положением при совершении предполагаемого маневра; V_n – желательная скорость движения; b_n^* – максимальное замедление.

Модель смены полосы движения Гиппса позволяет водителям изменять степень торможения b_n в зависимости от безотлагательности совершения маневра. Для достижения более точного отображения поведения водителя при смене полосы движения, рассматривается три отдельные зоны, каждая из которых соответствует различным мотивам смены полосы движения (рис. 1.8).

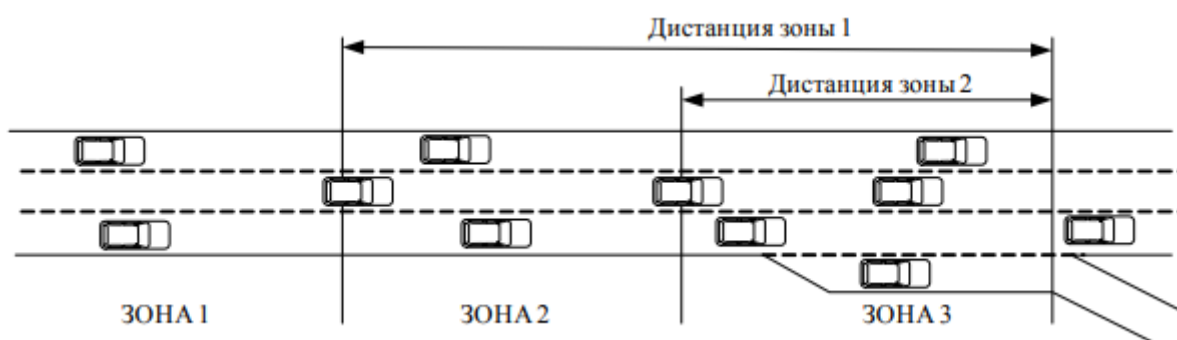


Рис. 1.8. Зоны смены полос движения

Зона 1: Самая удаленная зона от точки поворота. На принятие решения о смене полосы главным образом влияют условия движения на данной полосе. Необходимость последующего совершения поворота еще не учитывается. Для оценки преимуществ, которые получит водитель при смене полосы движения, учитывается несколько параметров: желаемая скорость водителя; скорость и дистанция до впереди идущего автомобиля на текущей полосе; скорость и дистанция до впереди идущего автомобиля на смежных полосах.

Зона 2: Промежуточная зона. Смена полосы движения главным образом определяется желанием занять нужную полосу для совершения поворота на

перекрестке. Автомобили, которые не движутся по допустимым полосам движения (с которых возможно выполнить требуемый поворот на перекрестке) стремятся занять позицию как можно ближе к полосе, с которой разрешен требуемый маневр поворота. Автомобили, подбирая интервал для совершения маневра, пытаются адаптировать свою скорость. При этом они не оказывают влияние на поведение водителей в смежных полосах движения.

Зона 3: Наиболее близкая зона к перекрестку. Автомобили вынуждены перестраиваться на полосы движения, с которых возможно выполнить требуемый маневр. В случае необходимости, для смены полосы движения уменьшают собственную скорость вплоть до полной остановки (gap forcing). В пределах данной области автомобили на смежных полосах движения могут также изменять свое поведение (courtesy yielding), предоставляя достаточно большой интервал для выполнения смены полосы движения.

Водитель идентифицирует тип пересечения (центральная полоса, съезд или въезд на магистраль, перекресток и т.д.) в котором должен быть выполнен маневр и определяет в какой зоне должно выполняться моделирование (рис. 1.9.). Анализируя текущие условия движения, водитель выбирается уровень, на котором должна быть выполнена смена полосы движения и применяет соответствующую модель.

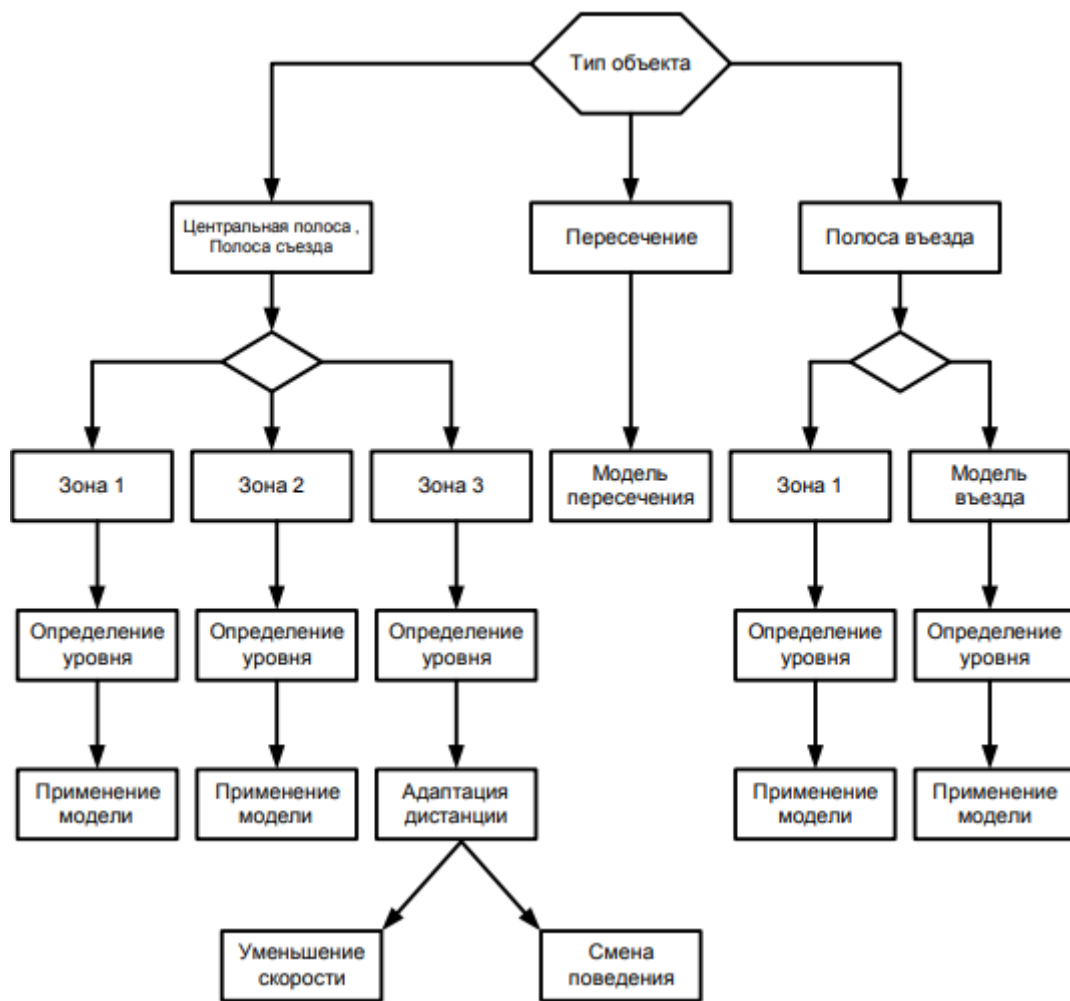


Рис. 1.9. Дерево принятия решений модели Гиппса

В целом структура модели достаточно гибкая, и может быть добавлено новое или специфичное правило. Однако, данная модель не предусматривает изменчивости в поведении отдельных водителей. В частности, не предусмотрено различие стратегий взаимодействия рассматриваемого автомобиля и окружающих автомобилей в различных условиях движения.

ГЛАВА 2. ЦЕЛИ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ.

Целью работы будет являться создание метода взаимодействия экземпляров дискретной модели транспортной системы в многопроцессорной системе.

Для достижения поставленной цели сформулированы и решены следующие задачи:

- 1) Метод пересчёта обобщённых параметров движения отдельных транспортных средств при переходе из одного сегмента дискретной модели в другой сегмент дискретной модели.
- 2) Разработка механизма распределения нагрузки и исследование его эффективности.

Для выявления лучшего пакета для нашей задачи выделим значимые для анализа транспортной ситуации критерии. Этими критериями будут являться:

- предоставление значимых параметров по умолчанию (1);
- ключевые параметры могут определяться пользователем (2); ограниченная --
- потребность в получении и накоплении данных (3);
- простая интеграция с другими моделями (4);
- простая интеграция с другими базами данных и ГИС-системами (5);
- одобрение местными/национальными транспортными организациями (6);
- возможность запуска на дешевых аппаратных средствах (например, PC, а не UNIX) (7);
- типичная скорость расчетов (F — быстро, S — медленно; число показывает, насколько расчет быстрее реального времени моделирования) (8);
- графическая анимация результатов моделирования (8);
- виды лицензии программного обеспечения (9);

Программа	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SUMO	X	X	-	X	X	-	PC, UNIX	X	FREE,open source
AIMSUN2	X	X	-	X	X	-	PC, UNIX	X	Commercial
CORSIM	X	X	X	X	-	FHWA	PC	X	Commercial
DRACULA	X	X	X	-	-	-	PC	X	Commercial
FLEXSYT II	X	X	-	X	-	-	PC	X	Commercial
PARAMICS	X	X	-	-	-	-	UNIX	X	Commercial
VISSIM	X	X	X	-	X	GMT	PC, UNIX	X	Commercial

Следуя информации из данной таблицы, очевидно, что по всем основным критериям симулятор SUMO нам подходит. Одной из ключевых особенностей пакета Simulation of Urban MObility является его высокая способность интеграции с открытыми платформами. SUMO интегрируется с другими микроскопическими и макроскопическими симуляторами, такими как VISUM, Vissim, OpenDRIVE и MATsim; и с информационными системами, включая Open Street Maps (OSM). Помимо этого, данный продукт является бесплатным, что в нашей ситуации будет определяющим параметром.

Объектом исследования являются транспортные потоки. В качестве предмета исследований выступают микроскопические модели автомобильного трафика.

Научная новизна. В работе предложен новый метод взаимодействия экземпляров дискретной модели транспортной системы в

многопроцессорной системе.

Для подтверждения правильности взаимодействия мы будем моделировать один и тот же дорожный сценарий разными способами:

- а) Запуск модели на одном процессоре без разбиения на сегменты;
- б) Запуск на нескольких процессорах, где каждый процессор обчисляет свой сегмент. Мы сможем оценить потенциальный выигрыш в производительности и поставить оценку точности такого исследования.

ГЛАВА 3. МЕТОД РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА ДИСКРЕТНОЙ МОДЕЛИ НА СЕГМЕНТЫ.

3.1. Создание модели транспортного потока в среде SUMO

Первое с чего стоит начать – это развёртывание среды.

- 1) Скачиваем установочный файл с сайта <https://sumo.dlr.de/wiki/Downloads>
- 2) Запускаем установочный файл, в нашем случае это sumo-win64-1.2.0.zip
- 3) Следуя инструкциям устанавливаем предложенное ПО

Дискретный симулятор SUMO позволяет несколькими способами задавать дорожные сценарии. Один из них заключается в прописывании вручную ваших собственных node, edge, route и connection файлов.

Второй способ позволяет импортировать уже готовую дорожную сеть из таких ресурсов ,как OSM, VISSIM, VISUM и т.д.

Третий же способ позволяет сделать аналогичный дорожный сценарий с помощью приложения NetEdit, которое устанавливается в одном пакете с SUMO. Приложение NetEdit обладает простым интерфейсом, хорошим быстродействием и все применённые изменения сразу же визуализируются. Таким образом я выбрал третий способ для создания своей дорожной сети. Моя сеть будет включать в себя четыре пункта отправления, четыре пункта

прибытия и два нерегулируемых светофора.

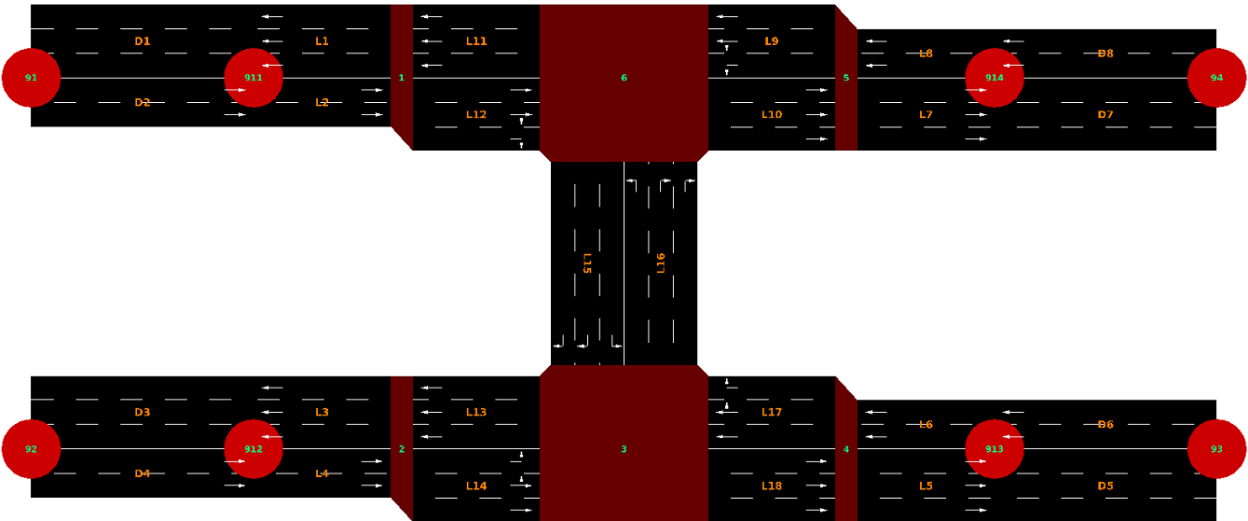


Рис 3.1

Перед проведением анализа трафика в SUMO, пример сети на рисунке 3.1 должен быть сначала построен с информацией, перечисленной в таблице 3.1.

node name	x-coordinate	y-coordinate
91	-1000.0	+1000.0
92	-1000.0	0.0
93	+3000.0	0.0
94	+3000.0	+1000.0
911	-500.0	+1000.0
912	-500.0	0.0
913	+2500.0	0.0
914	+2500.0	+1000.0
1	0.0	+1000.0
2	0.0	0.0
3	+1000.0	0.0
4	+2000.0	0.0
5	+2000.0	+1000.0
6	+1000.0	+1000.0

Таблица 3.1

На основе данных координат в таблице 1.1 и схемы сети на основе узловых связей на рисунке 3.1 пересечения, источники и места назначения кодируются соответственно, как узлы 1-6 и узлы 91-94, давая соответствующие x- и Y-координаты с программой NETEDIT. Сначала создадим новую сеть («Файл» -> «Новая сеть ...»). Затем выберем режим редактирования, как на рисунке 3.1

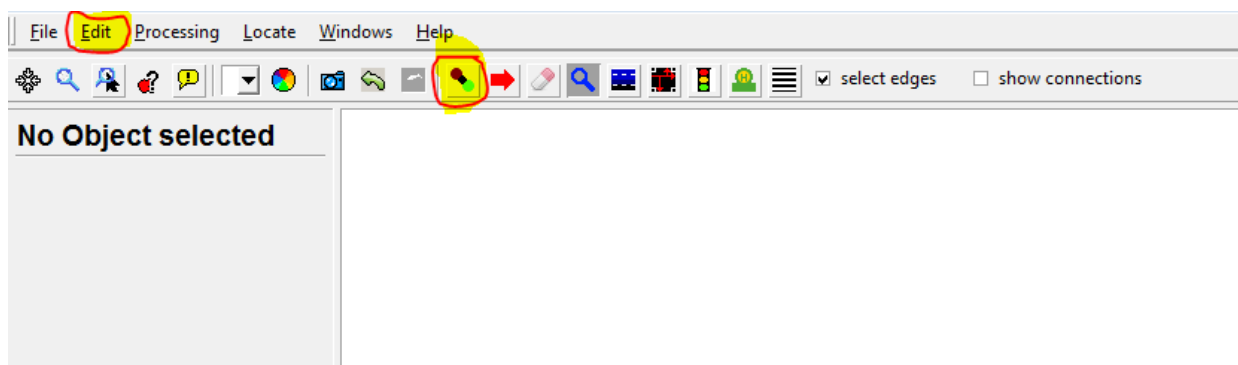


Рис. 3.2

Прежде всего, мы создадим один узел, а затем второй, нажимая на холст. Оба будут подключены автоматически, и мы получим свою первую грань (Рис 3.3).



Рис. 3.3

Следующим шагом является переключение в режим проверки (Inspection mode) и замена имени и положения узлов (Рис. 2.4), как определено в таблице 2.1 выше. Дороги представлены в SUMO в виде ссылок, как и в других программах моделирования движения. Чтобы определить

характеристики ссылки, идентификация (id) каждой ссылки должна быть сначала определена с помощью чисел, строк слов или того и другого.

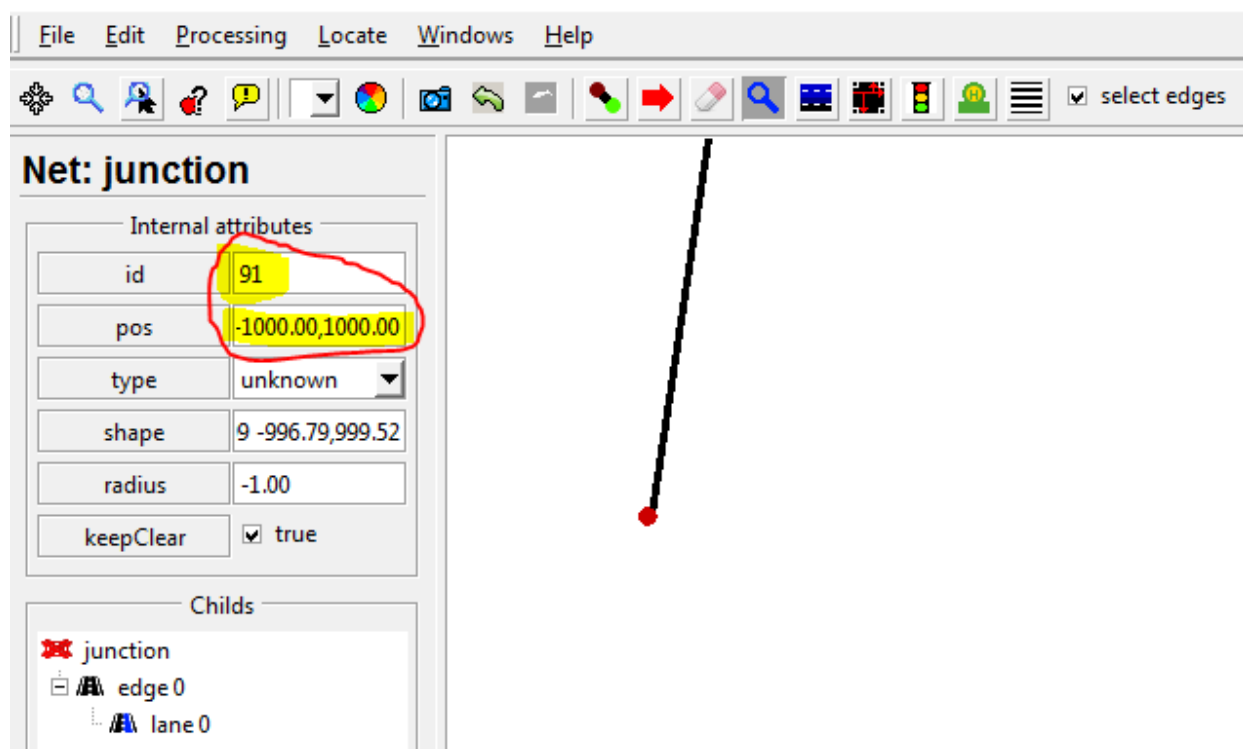


Рис. 3.4

Далее с помощью команды Add reverse direction мы добавляем каждой грани встречное движение.

Кроме того, один атрибут должен быть изменен, чтобы получить вывод, аналогичный описанному в примере: количество полос. Мы можем легко изменить количество полос, находясь в режиме проверки, как показано на рисунке 3.5

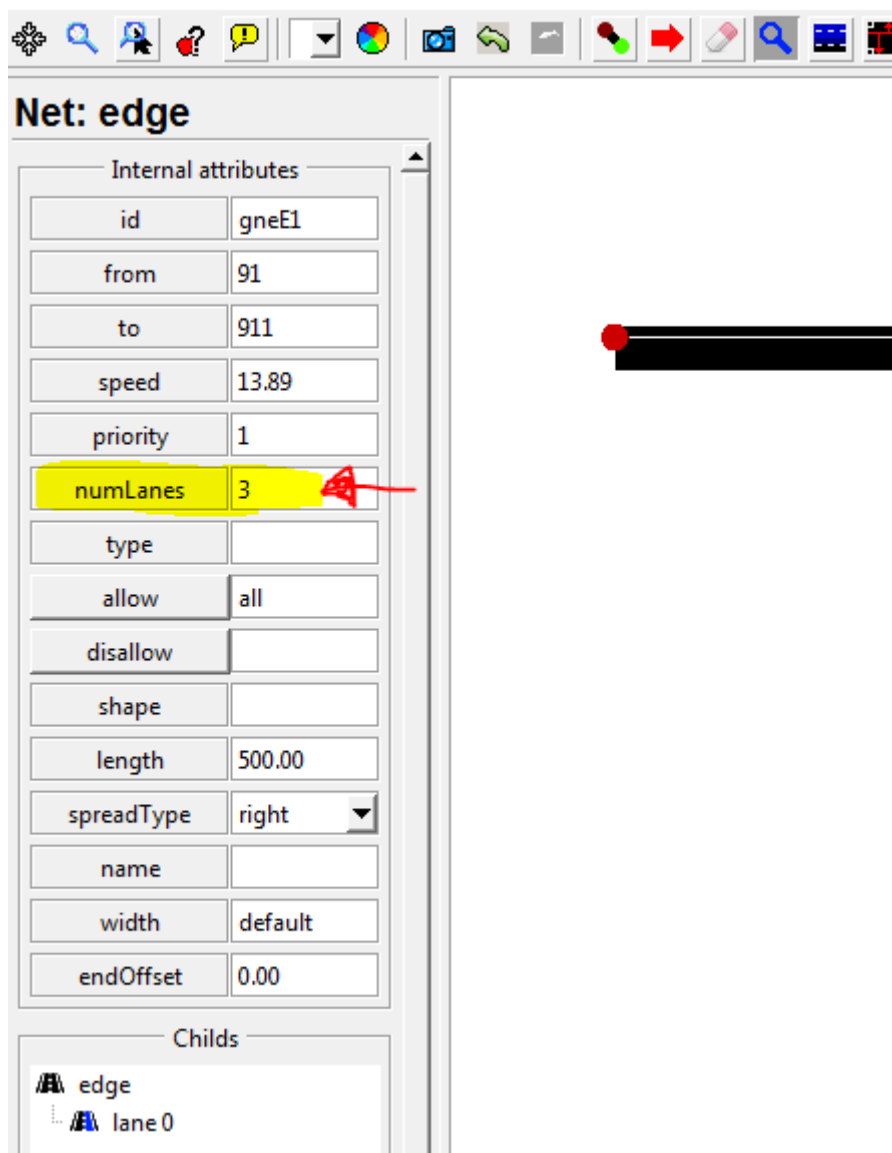


Рис.3.5

Далее этим же способом мы достраиваем модель так, чтоб на выходе получился исходный пример сети (Рис.3.1).

Следующим шагом будет определение связей между гранями.

Значение по умолчанию в SUMO основано на заданном геометрическом дизайне всех возможных и логических движений трафика. Развороты разрешены, если нет соответствующей спецификации. По умолчанию установлено, что крайняя правая полоса каждой ссылки выровнена по самой

правой полосе соответствующей нисходящей линии. В нашем примере ожидаются следующие соединения (Таблица 3.2):

edge ID from	edge ID to	fromLane	toLane
L2	L12	0	0
L2	L12	0	1
L2	L12	1	2
L4	L14	0	0
L4	L14	1	1
L4	L14	1	2
L9	L11	0	0
L9	L11	1	1
L9	L11	1	2
L9	L15	1	1
L9	L15	2	2
L16	L10	0	0
L16	L10	1	1
L16	L10	1	2
L16	L11	2	2
L12	L15	0	0
L12	L15	1	1
L12	L10	1	0
L12	L10	1	1
L12	L10	2	2
L14	L16	1	1
L14	L16	1	0
L14	L16	2	2
L14	L18	0	0
L14	L18	1	1
L14	L18	1	2
L17	L16	0	0
L17	L16	1	1
L17	L16	1	2
L17	L13	1	0
L17	L13	1	1
L17	L13	2	2

Таблица 3.2

Возвращаясь в режим проверки, мы можем изменить информацию о приоритете всех выбранных граней, щелкнув по одной из выбранных граней. Дороги на восток и запад с 3 полосами и 2 полосами должны иметь приоритет 3, а дороги на север (L16) и юг (L15) (более низкий приоритет 2).

Затем мы должны создать трафик в нашей сети. В примере сети имеется четыре типа транспортных средств (автомобили A, B, C и D). Все водители на 50% совершенны в вождении. Соответствующая информация приведена в таблице 3.3. Одно транспортное средство для каждого типа транспортного средства будет отправляться из каждого пункта отправления в каждый пункт назначения каждые 30 секунд в исследуемый период с 15:00 до 15:15.

Vehicle type	Max. acceleration(m/s)	Max. deceleration(m/s)	Length(m)	Max. speed(m/s)
Car A	3.0	6.0	5.0	50.0
Car B	2.0	6.0	7.5	50.0
Car C	1.0	5.0	5.0	40.0
Car D	1.0	5.0	7.5	30.0

Таблица 3.3

Данные о маршруте определяются вместе с данными о типе транспортного средства в файле с расширением .rou.xml. Соответствующий формат для

примера сети показан на рисунке 3.6

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<routes>
  <vType accel="3.0" decel="6.0" id="CarA" length="5.0" minGap="2.5" maxSpeed="50.0" sigma="0.5" />
  <vType accel="2.0" decel="6.0" id="CarB" length="7.5" minGap="2.5" maxSpeed="50.0" sigma="0.5" />
  <vType accel="1.0" decel="5.0" id="CarC" length="5.0" minGap="2.5" maxSpeed="40.0" sigma="0.5" />
  <vType accel="1.0" decel="5.0" id="CarD" length="7.5" minGap="2.5" maxSpeed="30.0" sigma="0.5" />
  <route id="route01" edges="D2 L2 L12 L10 L7 D7"/>
  <route id="route02" edges="D2 L2 L12 L15 L18 L5 D5"/>
  <route id="route03" edges="D2 L2 L12 L15 L13 L3 D3"/>
  <route id="route04" edges="D4 L4 L14 L18 L5 D5"/>
  <route id="route05" edges="D4 L4 L14 L16 L10 L7 D7"/>
  <route id="route06" edges="D4 L4 L14 L16 L11 L1 D1"/>
  <route id="route07" edges="D6 L6 L17 L13 L3 D3"/>
  <route id="route08" edges="D6 L6 L17 L16 L11 L1 D1"/>
  <route id="route09" edges="D6 L6 L17 L16 L10 L7 D7"/>
  <route id="route10" edges="D8 L8 L9 L11 L1 D1"/>
  <route id="route11" edges="D8 L8 L9 L15 L13 L3 D3"/>
  <route id="route12" edges="D8 L8 L9 L15 L18 L5 D5"/>
  <vehicle depart="54000" id="veh0" route="route01" type="CarA" color="1,0,0" />
  <vehicle depart="54000" id="veh1" route="route02" type="CarA" />
  <vehicle depart="54000" id="veh2" route="route03" type="CarA" />
  <vehicle depart="54000" id="veh3" route="route04" type="CarA" />
  <vehicle depart="54000" id="veh4" route="route05" type="CarA" />
  <vehicle depart="54000" id="veh5" route="route06" type="CarA" />
  <vehicle depart="54000" id="veh6" route="route07" type="CarA" />
  <vehicle depart="54000" id="veh7" route="route08" type="CarA" />
  <vehicle depart="54000" id="veh8" route="route09" type="CarA" />
  <vehicle depart="54000" id="veh9" route="route10" type="CarA" />
  <vehicle depart="54000" id="veh10" route="route11" type="CarA" />
  <vehicle depart="54000" id="veh11" route="route12" type="CarA" />
  <vehicle depart="54000" id="veh12" route="route01" type="CarB" color="1,0,0" />
  <vehicle depart="54000" id="veh13" route="route02" type="CarB" />
  <vehicle depart="54000" id="veh14" route="route03" type="CarB" />
  <vehicle depart="54000" id="veh15" route="route04" type="CarB" />
  <vehicle depart="54000" id="veh16" route="route05" type="CarB" />
  <vehicle depart="54000" id="veh17" route="route06" type="CarB" />
  <vehicle depart="54000" id="veh18" route="route07" type="CarB" />
  ...
</routes>
```

Рисунок 3.6

На рисунке 3.6 показано, что все типы транспортных средств сначала определяются в соответствии с информацией в таблице 3.1. Связанные атрибуты включают в себя:

- (a) id: идентификатор типа транспортного средства, определенный пользователями с номерами, строками слов ;
- (b) accel: максимальное ускорение соответствующего типа транспортного средства (в м / с²);
- (c) decel: максимальное замедление для соответствующего типа транспортного средства (в м / с²);
- (d) sigma: несовершенство водителя при вождении (от 0 до 1);

(e) length: длина транспортного средства (в метрах);

(f) maxSpeed: максимальная скорость автомобиля (в м / с);

(g) color: цвет типа транспортного средства. Он определяется 3 цифрами (от 0 до 1) для красного, зеленого и синего соответственно. Значения разделяются запятой и в кавычках без пробелов между значениями. Например, 1,0,0 представляет красный цвет, 0,1,0 представляет зеленый и 0,0,1 представляет синий.

Последовательность атрибутов может быть изменена. Атрибут сигма назначается как 0,5 для всех типов транспортных средств.

После информации о типе транспортного средства также должны быть определены данные маршрута движения. Входные атрибуты включают в себя:

(a) id: идентификатор определенного маршрута и определяется пользователями с помощью чисел, строк слов или обоих.

(б) edges: последовательность имен ссылок, составляющих определенный маршрут.

Данные о трафике определяются четырьмя атрибутами:

(a) depart: время отправления определенного транспортного средства.

(б) id: идентификатор определенного транспортного средства и определяется пользователями с номерами, строками слов или обоими.

(с) route: маршрут, используемый определенным транспортным средством.

(d) type: идентификатор определенного типа транспортного средства.

Моделирование трафика в SUMO может проводиться двумя способами, как описано ниже на рисунке 3.7.

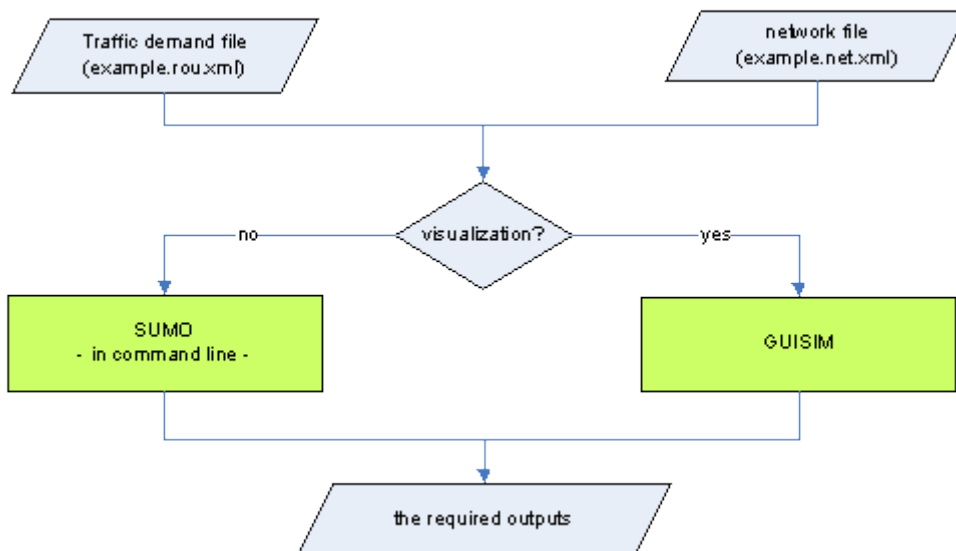


Рис.3.7.

Эффективное выполнение моделирования трафика может быть достигнуто с использованием командной строки, особенно при работе с большими и сложными сетями трафика. Чтобы упростить процесс выполнения, рекомендуется, чтобы все необходимые действия выполнения, например, путь и имя входных файлов, типы вывода, каталог вывода и период времени моделирования указывались в файле конфигурации.

Файл конфигурации для симуляции трафика нашей сети (quickstart.sumocfg)

```

<?xml version="1.0" encoding="iso-8859-1"?>
<configuration xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance"
xsi:noNamespaceSchemaLocation="http://sumo.dlr.de/xsd/sumoConfiguration.xsd">
  <input>
    <net-file value="quickstart.net.xml"/>
    <route-files value="quickstart.rou.xml"/>
  </input>
  <time>
    <begin value="54000"/>
    <end value="54900"/>
  </time>
  <time-to-teleport value="-1"/>
</configuration>

```

Рис. 3.8

Здесь мы используем параметр `<time-to-teleport value = "- 1" />`, чтобы отключить автоматическое удаление транспортных средств, которые слишком долго ждут перед перекрестком. Моделирование трафика может быть выполнено с помощью следующей команды:

```
sumo -c quickstart.sumocfg
```

Применение SUMO-GUI - это другой способ выполнить моделирование трафика с помощью SUMO. Во время выполнения можно наблюдать за каждым движением транспортного средства и развитием движения и визуально определять возможные узкие места. Исследуемую сеть можно активировать, открыв соответствующий файл конфигурации в меню Файл в строке меню. Моделирование движения может быть выполнено нажатием зеленой кнопки треугольника на главной панели инструментов. Симуляция может быть остановлена в любое время, когда пользователь нажимает красную квадратную кнопку. Остановленная симуляция может быть возобновлена нажатием зеленого треугольника, если время симуляции не истекло.

В следующей главе с помощью netedit мы создадим параметры светофорного регулирования (Рис.3.8) в нашей дорожной сети для обоих перекрёстков.

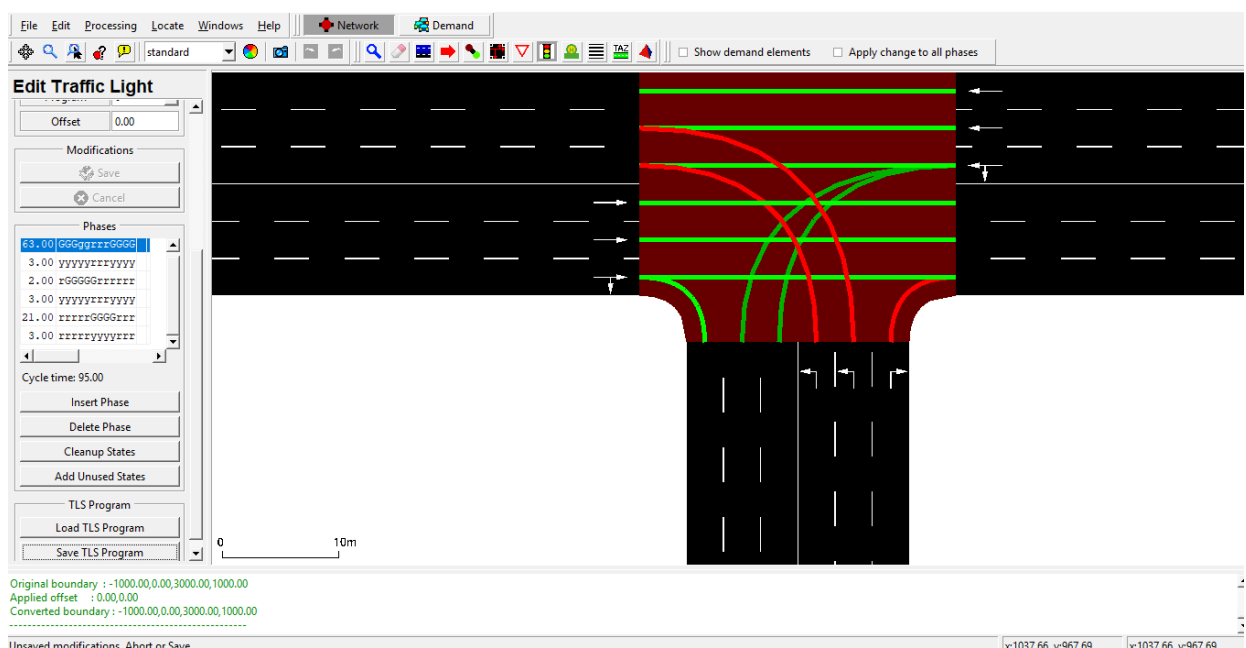


Рис. 3.8

Далее сохраним эти параметры, как additional file.

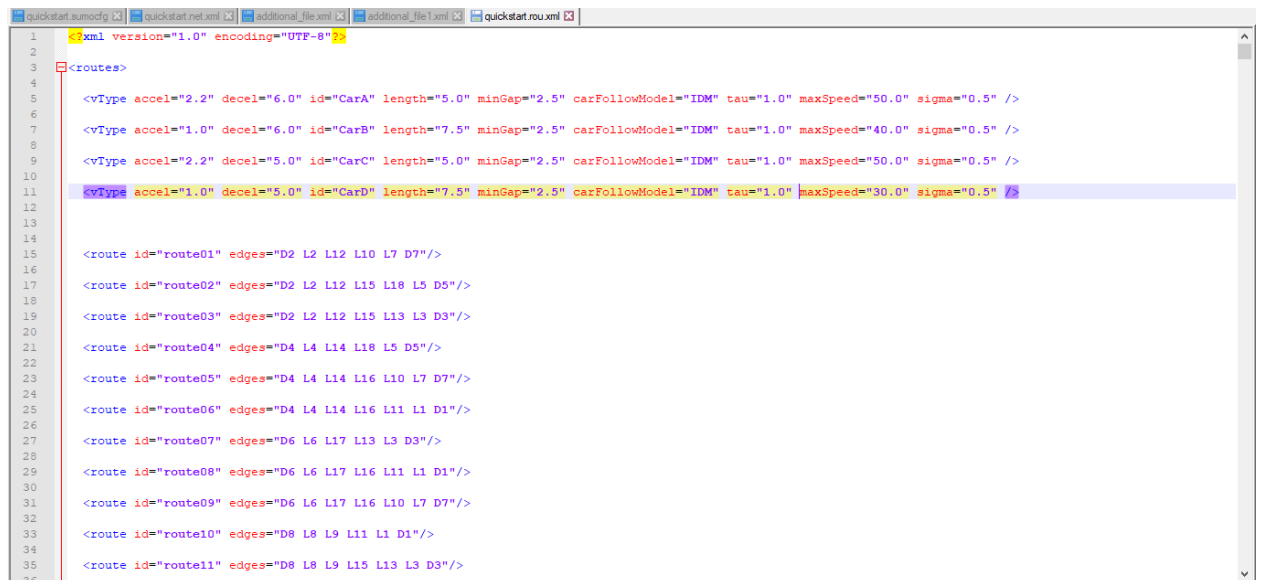
Теперь в нашей дорожной сети есть светофорное регулирование на обоих перекрёстках.

Далее мы зададим приближённое к реальности ускорение для автомобилей в нашей сети, чтобы воссоздать, как можно более реальную ситуацию.

Для легковых автомобилей это 2.2 м/с^2 . Для грузовых автомобилей это 1 м/с^2 .

Следующим этапом будет добавление параметра `carFollowModel="IDM"` в .rou файл для того, транспортные потоки нашей сети придерживались этой модели.

Но также необходимо после этого добавить параметр `tau`. Этот параметр предназначен для моделирования желаемого времени движения водителя (в секундах). Используется всеми моделями. Водители пытаются поддерживать минимальный промежуток времени `tau` между задним бампером своего лидера и их собственным передним бампером + `minGap`, чтобы обеспечить возможность затормозить вовремя, когда их лидер начинает торможение, и им также нужно время реакции в секундах `tau`, чтобы начать ломаться. ,
Реальное время реакции существенно ограничено размером шага симуляции, соответственно. По этой причине значение `tau` ниже этого размера шага может привести к столкновениям, если лидер внезапно начнет резко тормозить. Если `tau` больше, чем размер шага, ситуация безопасна, но водители будут реагировать во время каждого шага моделирования, если не используется опция `--default.action-step-length`. Теперь наш .rou файл выглядит ,как показано на рисунке 3.8



```
1 <?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
2
3 <routes>
4
5   <vType accel="2.2" decel="6.0" id="CarA" length="5.0" minGap="2.5" carFollowModel="IDM" tau="1.0" maxSpeed="50.0" sigma="0.5" />
6
7   <vType accel="1.0" decel="6.0" id="CarB" length="7.5" minGap="2.5" carFollowModel="IDM" tau="1.0" maxSpeed="40.0" sigma="0.5" />
8
9   <vType accel="2.2" decel="5.0" id="CarC" length="5.0" minGap="2.5" carFollowModel="IDM" tau="1.0" maxSpeed="50.0" sigma="0.5" />
10
11   <vType accel="1.0" decel="5.0" id="CarD" length="7.5" minGap="2.5" carFollowModel="IDM" tau="1.0" maxSpeed="30.0" sigma="0.5" />
12
13
14   <route id="route01" edges="D2 L2 L12 L10 L7 D7"/>
15
16   <route id="route02" edges="D2 L2 L12 L15 L8 D5"/>
17
18   <route id="route03" edges="D2 L2 L12 L15 L13 L3 D3"/>
19
20   <route id="route04" edges="D4 L4 L14 L18 L5 D5"/>
21
22   <route id="route05" edges="D4 L4 L14 L16 L10 L7 D7"/>
23
24   <route id="route06" edges="D4 L4 L14 L16 L11 L1 D1"/>
25
26   <route id="route07" edges="D6 L6 L17 L13 L3 D3"/>
27
28   <route id="route08" edges="D6 L6 L17 L16 L11 L1 D1"/>
29
30   <route id="route09" edges="D6 L6 L17 L16 L10 L7 D7"/>
31
32   <route id="route10" edges="D8 L8 L9 L11 L1 D1"/>
33
34   <route id="route11" edges="D8 L8 L9 L15 L13 L3 D3"/>
35
```

Рисунок 3.9

Итак, у нас получилась работающая дискретная модель дорожной сети, приближённая к реальной жизни.

3.2 Выгрузка и отладка модели реального города в среде SUMO

Далее для создания конечной модели дорожного трафика нам понадобится версия Python 2.7 и выше. Скачиваем последнюю версию с сайта

<https://www.python.org/downloads/> . Далее добавляем Python в PATH.

Для создания реальной карты дорожного движения мы воспользовались уже имевшимся у нас скриптом OSMWebWizard.py, находящимся в корневой папке SUMO. Далее мы запускаем этот скрипт с помощью команды `python oswwebwizard.py` и запускается браузер с открытой картой, в которой мы выбираем нужный нам участок и генерируем его (как показано на рис. 3.10) .

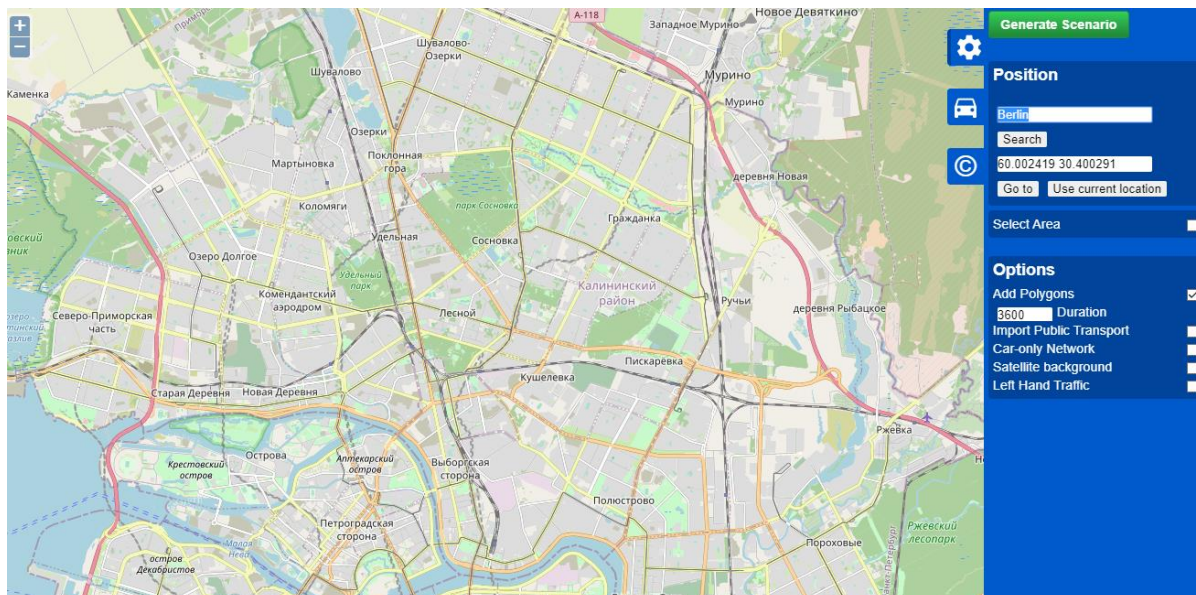


Рис. 3.10

После этого в корневой папке SUMO создаётся папка ,в названии которой дата генерации сценария. В ней расположены все необходимые для запуска модели файлы, в которых указаны все значения по умолчанию. Значения по умолчанию в этой модели не позволяют назвать её реальной, так что мы сами прописываем маршруты и виды автомобилей в `osm.rou.xml`. В нашей модели изначально будет 5 разных маршрутов и два типа автомобилей. Все маршруты начинаются из разных точек и заканчиваются тоже в разных точках, при это пересекаясь, по ходу маршрутов.

3.3. Настройка и управление транспортной моделью с помощью TraCI

Чтоб запустить симуляцию ,используем следующую команду в командной строке : `sumo-gui -n osm.net.xml -r osm.passenger.trips.xml --end 7200`

Для управления нашей транспортной моделью мы будем использовать модуль TraCI. TraCI использует архитектуру клиент / сервер на основе TCP для обеспечения доступа к SUMO(как показано на рисунке 2.11). Таким образом, SUMO действует как сервер, который запускается с дополнительными параметрами командной строки: `--remote-port 8813`, где

8813 - порт, который SUMO будет прослушивать для входящих соединений.

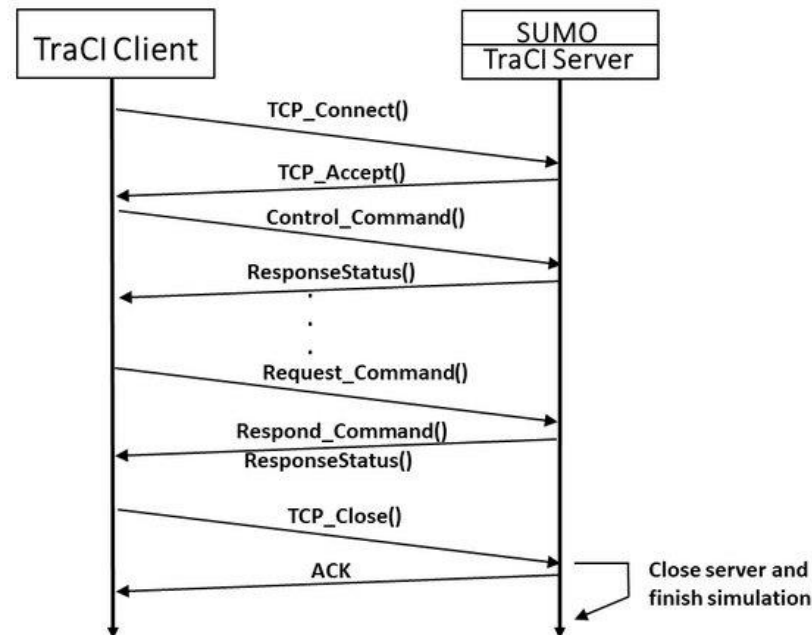


Рисунок 3.11

Само моделирование в SUMO работает на одном ядре. Однако маршрутизацию в SUMO можно распараллелить, установив параметр `--device.rerouting.threads` и `--routing-threads` соответственно. Когда используются эти опции, используются несколько ядер на машине. Для распараллеливания моделирования требуется разделение сценария и его маршрутов, для достижения этого использовался метод, при котором мы разделяли нашу модель на равно мерные части, кратные 2/4/8. Из этого было получено несколько сценариев. Затем сегменты должны быть синхронизированы друг с другом, чтобы гарантировать результаты, аналогичные централизованному моделированию.

Глава 4. Экспериментальное исследование

4.1. Вычисление оптимальной производительности

Проведём 4 вычисления эффективности распараллеливания нашей модели SUMO.

- 1) В первом эксперименте запустим эталонную модель на одном процессоре. В итоге получим реальное время выполнения симуляции 28 минут = 1680 секунд. Это будет 100% времени.
- 2) Во втором случае мы запустим модель разбитую на два сегмента, используя два разных потока для этого. В итоге получим реальное время выполнения симуляции 15 минут = 900 секунд.
- 3) На третьем этапе эксперимента мы запустим модель, разбитую на 4 сегмента на 4 разных потоках. По результатам получим реальное время выполнения 537 секунд = 8,95 минут.
- 4) В заключении, запустим модель разбитую на 8 сегментов на 8 разных потоках. В результате получим реальное время выполнения равное 432 секундам.

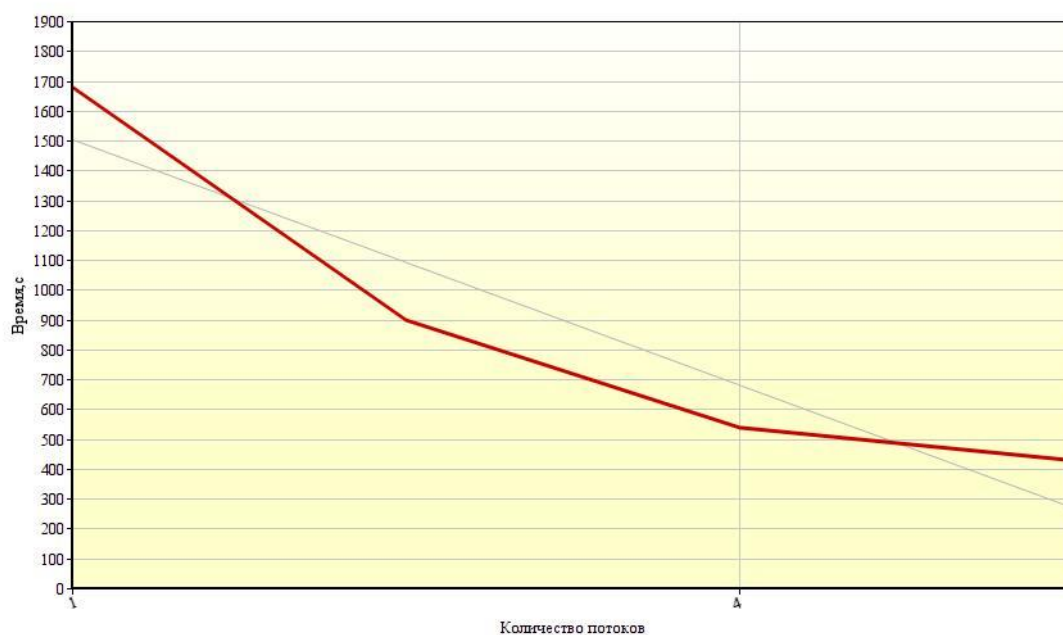


Рис. 4.1

Исходя из полученных результатов тестов, можем утверждать, что наиболее эффективным использованием многопроцессорной системы будет её разделение на 2 и 4 потока, соответственно. Начиная с разделения на 8 потоков и более, выигрыш в производительности не будет являться существенным. Для производительности использовалось время моделирования; для точности расстояние между транспортным средством в централизованной модели и сегментированной. Теперь мы можем высчитать точность наших моделей, сравнивая на какое количество шагов они отстают или опережают эталонную модель.

4.2. Вычисление зависимости точности от количества потоков

В качестве эксперимента был выбран один и тот же набор транспортных средств для каждой модели. Каждый автомобиль имеет свой уникальный `veh_id` и не повторяется. Путём проведения 10 симуляций для каждой модели и фиксирования значений, выбранных автомобилей в каждой точке времени, мы получили результаты, показанные на рисунке 4.2



Рис. 4.2

Из этой таблицы следует, что чем на большее количество сегментов поделена модель, тем ниже будет её точность относительно эталонной версии. Исходя из полученных результатов, мы можем определять для себя цели будущих исследований и правильно выбирать количество необходимых потоков при моделировании многопроцессорной системы.

Также в ходе эксперимента мы пришли к выводу, что в дальнейшем один из сегментов можно заменить на любую другую модель, например модель гидродинамики. Это могло бы позволить сократить накладные расходы при моделировании и улучшить производительность отдельных моделей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В этой работе был предложен метод взаимодействия экземпляров дискретной модели транспортной системы в многопроцессорной системе. Результаты показывают, что с точки зрения точности метод является приемлемым, но чрезмерное увеличение потоков увеличит погрешность, и это расхождение с эталонной моделью пропорционально количеству сегментов, на которые поделена модель. С точки зрения производительности, параллельное моделирование быстрее, чем его централизованный аналог. Оптимальное число потоков, без существенной потери точности, колеблется от двух до четырёх.

Из этого можно сделать вывод, что:

1. Хотя процесс разделения транспортной сети относительно прост в выполнении, не существует алгоритма для нахождения оптимального разбиения сети на разные возможные конфигурации для параллельного моделирования.
2. Для достижения большей общей эффективности параллельного моделирования по сравнению с централизованным, и не только при интенсивном использовании TraCI, необходимо синхронизировать и симулировать различные разделы из SUMO. Так же у нас появляется возможность заменять дискретные сегменты модели на любые другие возможные варианты, в том числе использовать гидродинамическую модель на прямых участках транспортной сети.

Предлагаю для будущих работ реализовать стратегию синхронизации непосредственно в исходном коде SUMO.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Математическое моделирование загрузки транспортных сетей / В.И. Швецов, А.С. Алиев. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 64 с.
2. Моделирование дорожного движения [Электронный ресурс]: учебное пособие для студентов специальности 190702 «Организация и безопасность движения» очной формы обучения / А. В. Косолапов – Электрон. дан. – Кемерово: КузГТУ, 2012.
3. Организация дорожного движения [Текст]: учеб. для вузов. – 5-е изд., перераб. и доп. / Клинковштейн Г. И., Афанасьев М. Б. – М: Транспорт, 2001 – 247 с.
4. A study of traffic capacity / Greenshields B.D. // Proc. (US) Highway Research Board. 1934. Vol. 14. pp. 448 – 494.
5. An analysis of traffic flow / Greenberg H. // Operations Research. 1959. Vol. 7. pp. 79-85.
6. A simplified car-following theory: a lower order model. / Newell G.F. // Transp. Res. B 36, 2002. pp. 195–205
7. M. Bando, K. Hasebe, A. Nakayama, A. Shibata, and Y. Sugiyama, Phys. Rev. E 51 (1995) 1035
8. Dynamic behavior of traffic with a nonlinear spacing speed relationship / E. Kometani and T. Sasaki. // In Proceedings of the Symposium for Theory Traffic Flow. Research Laboratories General Motors. New York. 1959. pp.105– 109
9. An operational analysis of traffic dynamics / L. A. Pipes // Journal of Applied Physics. 24(1). 1953. pp. 274– 287
10. A behavioural car-following model for computer simulation. / P. G. Gipps // Transportation Research Part B, 15(2). 1981. pp. 105–111
11. Metastable States in a Microscopic Model of Traffic Flow / S. Krauß, P.Wagner, C. Gawron // Physical Review E. 1997. Vol. 55. №304. pp. 55-97
12. Perceptual Factors in Car Following / Michaelis R.M. // Proceedings from the Second International Symposium on Transportation and Traffic Theory, OECD. Paris. 1965
13. Simulation des Strassenverkehrsflusses / Wiedemann R. // Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen Heft 8, Universität Karlsruhe. 1974
14. A model for the structure of lane changing decisions. / P. A. Gipps // Transportation Research, Part B. 20(5). 1986. pp. 107–120

15. Modeling lane changing and merging in microscopic traffic simulation / P. Hidas // *Transportation Research Part C*. 10(5). 2002. pp. 351–371
16. A microscopic traffic simulator for evaluation of dynamic traffic management systems / Q. Yang and H. N. Koutsopoulos // *Transportation Research Part C*, 4(3). 1996. pp. 113–129
17. T. Toledo. Integrated driving behavior modeling. PhD thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, MIT, Cambridge, MA, 2003.
18. Comments on the highway crossing problem / R. Herman, G. H. Weiss. // *Operations Research*. 9(6). 1961. pp. 828–840
19. D. R. Drew, L. R. LaMotte, J. H. Buhr, and J. A. Wattleworth. Gap acceptance in the freeway merging progress. Technical Report 430-2, Texas Transportation Institute. Texas. 1967.
20. Some problems in traffic delay / G. H. Weiss, A. A. Maradudin // *Operations Research*, 10. 1962. pp. 74–104,.
21. Estimation of gap acceptance parameters within and across the population from direct roadside observation / C. F. Daganzo // *Transportation Research Part B*. 15(1) 1981. pp. 1–15,.
22. A model for the structure of lane changing decisions / P. A. Gipps // *Transportation Research Part B*. 20(5). 1986. pp. 107–120
23. Daniel Krajzewicz, Jakob Erdmann, Michael Behrisch, and Laura Bieker. Recent development and applications of SUMO - Simulation of Urban MObility. *International Journal On Advances in Systems and Measurements*, 5(3&4):128–138, December 2012.
24. J Jin and X Ma. Stochastic optimization of signal plan and coordination using parallelized traffic simulation. In *Proceedings of the 2nd SUMO User Conference*, Berlin, 2014. Deutsches Zentrum f'ur Luft - und Raumfahrt e.V.
25. P Heywood, S Maddock, J Casas, D Garcia, M Brackstone, and P Richmond. Data-parallel agentbased microscopic road network simulation using graphics processing units. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 1(13), 2017.
26. J Eising, F Fischer, J Flaig, O Florian, C Fritze, K Indych, M Montenegro, S M'uller, M Schneider, N Vieregge, A Wegge, H D'obler, F Koller, O Menzel, S Dietzel, and B Scheuermann. PARCOURS: A SUMO-Integrated 3D Driving Simulator for Behavioral Studies. In *Proceedings of the 4th SUMO User Conference*, pages 135–146, Berlin, 2016. Deutsches Zentrum f'ur Luft - und Raumfahrt e.V.

27. Quentin Bragard, Anthony Ventresque, and Liam Murphy. dSUMO: towards a distributed SUMO - Simulation of Urban MObility. 2013.
28. R Blokpoel. Network Conversion for SUMO Integration. In Proceedings of the 2nd SUMO User Conference, pages 35–44, Berlin, 2014. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
29. R Blokpoel. Interface between proprietary Controllers and SUMO. In Proceedings of the 2nd SUMO User Conference, pages 27–33, Berlin, 2014. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
30. Strategies for Network Partitioning and Border Edges Management. In Proceedings of the 4th SUMO User Conference, pages 61–71, Berlin, 2016. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

Приложение 1

Скрип запуска модели транспортного потока с помощью модуля TraCI и Python

```
import os
```

```
import sys
```

```
import optparse
```

```
# we need to import some python modules from the  
$SUMO_HOME/tools directory
```

```
if 'SUMO_HOME' in os.environ:
```

```
    tools = os.path.join(os.environ['SUMO_HOME'], 'tools')
```

```
    sys.path.append(tools)
```

```
else:
```

```
    sys.exit("please declare environment variable 'SUMO_HOME'")
```

```
from sumolib import checkBinary # Checks for the binary in environ  
vars
```

```
import traci
```

```
PORT = "8833"
```

```
def get_options():
```

```
    opt_parser = optparse.OptionParser()
```

```
    opt_parser.add_option("--nogui", action="store_true",
```

```
        default=False, help="run the commandline version of  
sumo")
```

```
    options, args = opt_parser.parse_args()
```

```
    return options
```

```
# contains TraCI control loop
```

```
def run():
```

```
    step = 0
```

```
    while traci.simulation.getMinExpectedNumber() > 0:
```

```
        traci.simulationStep()
```

```
        print(step)
```

```
        step += 1
```

```
    traci.close()
```

```
    sys.stdout.flush()
```

```
# main entry point
```

```
if __name__ == "__main__":
```

```
    options = get_options()
```

```
# check binary
```

```

if options.nogui:
    sumoBinary = checkBinary('sumo')
else:
    sumoBinary = checkBinary('sumo-gui')

# traci starts sumo as a subprocess and then this script connects and
runs
traci.start([sumoBinary, "-c", "osm.sumocfg",
              "--tripinfo-output", "tripinfo.xml"])

run()

```

Приложение 2

Централизованная модель транспортного потока

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
```

```

<!-- generated on 05/31/20 14:40:15 by Eclipse SUMO duarouter Version 1.2.0
<configuration xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance"
xsi:noNamespaceSchemaLocation="http://sumo.dlr.de/xsd/duarouterConfiguration
.xsd">

```

```
<input>
```

```

    <net-file value="C:\Users\roman\Downloads\sumo-win64-1.6.0\sumo-
1.6.0\tools\2020-05-31-14-40-02\osm.net.xml"/>

```

```

    <route-files value="C:\Users\roman\Downloads\sumo-win64-1.6.0\sumo-
1.6.0\tools\2020-05-31-14-40-02\osm.passenger.trips.xml"/>

```

```
</input>
```

```
<output>
```

```

    <output-file value="C:\Users\roman\Downloads\sumo-win64-1.6.0\sumo-
1.6.0\tools\2020-05-31-14-40-02\osm.passenger.trips.xml.tmp"/>

```

```

    <write-trips value="true"/>
</output>

<time>
    <begin value="0"/>
    <end value="3600.0"/>
</time>

<report>
    <no-warnings value="true"/>
    <ignore-errors value="true"/>
    <no-step-log value="true"/>
</report>

</configuration>

-->

<routes xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance"
xsi:noNamespaceSchemaLocation="http://sumo.dlr.de/xsd/routes_file.xsd">

    <vType id="car"
        vClass="passenger" length="5" accel="3.5" decel="2.2"
        sigma="1.0" maxSpeed="10"/>

    <vType id="ev"
        vClass="emergency" length="7" accel="5.5" decel="2.2" sigma="1.0"
        maxSpeed="20" guiShape="emergency" speedFactor="2.0"
        minGapLat="0.2"/>

```

<route id="route_0" edges="380299285#0 77909104#0 380271883#0
172851592 571838725#0 571956627 31386920#0 31396561#0 131611143#0
361354572#0" />

<route id="route_1" edges="35159397#0 509506598#0 509506598#2
509507333 509507332 509507337#0 509508056#0 509508053#0 509508053#1
509508055 249794599 571956626 571956627 249794595 571956628
31398253#0 194972641#0 200468564#0" />

<route id="route_2" edges="-77909115#8 -198269751#2 -38927795#8 -
194972653#13 -194972653#6 31367816#0 -200468557#11 -31371816#13
22995907#0 138017159#3 138017160#3 138017160#10 449768842
138017165#0" />

<route id="route_3" edges="126211617#0 380271882#2 126211616#0
126211616#2 4460973 197935144 13699238 31371500#0-AddedOnRampEdge
31371500#0 4459534 31403670#0 31403670#2 571838725#0 571956627
249794595 571956628 31398253#0 194972641#0 138017160#0 -31386636#14
31386636#0 138017160#3 138017160#10 -31397947#8 -31397947#1
691820906#0 691820905#0 691820905#2-AddedOnRampEdge 691820905#2
691820905#2-AddedOffRampEdge 728173778" />

<route id="route_4" edges="-31378418#2 32671687#0 -194972653#6 -
200468563#13 -23083718#8 -413390837#1 653459583#9 23083718#0
23083718#3 -200468563#9 -200468563#5 -636914137#2 768738667#0
768738667#8 768738673#0 768738673#2 769136673#0" />

<!--<flow id="carflow" type="car" beg="0" end="0" number="5" from="e1"
to="e8"/>-->

<!--<flow id="evflow" type="ev" beg="0" end="0" number="1" from="e1"
to="e8"/>-->

<vehicle id="0" type="car" route="route_0" depart="0"/>

<vehicle id="1" type="car" route="route_0" depart="1"/>

<vehicle id="2" type="car" route="route_0" depart="2"/>

<vehicle id="3" type="car" route="route_0" depart="9"/>

<vehicle id="4" type="car" route="route_0" depart="12"/>

<vehicle id="5" type="car" route="route_1" depart="0"/>

<vehicle id="6" type="car" route="route_1" depart="3"/>
<vehicle id="7" type="car" route="route_1" depart="6"/>
<vehicle id="8" type="car" route="route_1" depart="9"/>
<vehicle id="9" type="car" route="route_1" depart="12"/>

<vehicle id="10" type="car" route="route_2" depart="0"/>
<vehicle id="11" type="car" route="route_2" depart="3"/>
<vehicle id="12" type="car" route="route_2" depart="6"/>
<vehicle id="13" type="car" route="route_2" depart="9"/>
<vehicle id="14" type="car" route="route_2" depart="15"/>

<vehicle id="15" type="car" route="route_3" depart="0"/>
<vehicle id="16" type="car" route="route_3" depart="3"/>
<vehicle id="17" type="car" route="route_3" depart="6"/>
<vehicle id="18" type="car" route="route_3" depart="9"/>
<vehicle id="19" type="car" route="route_3" depart="18"/>

<vehicle id="20" type="car" route="route_4" depart="0"/>
<vehicle id="21" type="car" route="route_4" depart="3"/>
<vehicle id="22" type="car" route="route_4" depart="6"/>
<vehicle id="23" type="car" route="route_4" depart="9"/>
<vehicle id="24" type="car" route="route_4" depart="21"/>

<vehicle id="ev_0" type="ev" route="route_0" depart="16"/>

</routes>

Приложение 3

Запуск модели с двух разных клиентов

```
traci.start(sumoCmd, port=8813, label="sim1")
```

```
conn1 = traci.getConnection("sim1")
```

```
conn1.setOrder(1)
```

Client 1:

```
sumoBinary = "C:\\Home\\Sumo_Eclipse\\Releases\\sumo-win64-1.1.0\\sumo-1.1.0\\bin\\sumo-gui"
```

```
sumoCmd = [sumoBinary, "-c", osm.cfg]
```

```
traci.start(sumoCmd, port=8813, label="sim1")
```

```
conn1 = traci.getConnection("sim1")
```

```
conn1.setOrder(1)
```

```
step = 0
```

```
while step < 1000:
```

```
conn1.simulationStep()
```

```
step += 1
```

```
conn1.close()
```

Client 2:

```
traci.init(port=8813, label="sim2")
```

```
conn2 = traci.getConnection("sim2")
```

```
conn2.setOrder(2)
```

```
step = 0
```

```
while step < 1000:
```

```
    conn2.simulationStep()
```

```
    step += 1
```

```
conn2.close()
```


Приложение 4

Вывод статистических данных из модели транспортного потока

```
import os, sys
import optparse
import subprocess
import random
import time
import collections
import copy
from subprocess import call
import argparse

# we need to import python modules from the $SUMO_HOME/tools directory
SUMO_HOME = "/home/roma/SUMO/sumo-0.19.0"

if 'SUMO_HOME' in os.environ:
    tools = os.path.join(os.environ['SUMO_HOME'], 'tools')
    sys.path.append(tools)
else:
    sys.exit("please declare environment variable 'SUMO_HOME'")

from sumolib import checkBinary
import traci

mapFile = "osm.net.xml"
routeFile = "osm.passenger.trips.xml" # the generated route file (output)
tripInfoFile = "roma.trips.xml" # the generated trip file (output, to extract statistics
from it)
PORT = "8833"
```

```
def get_options():  
    opt_parser = optparse.OptionParser()  
    opt_parser.add_option("--nogui", action="store_true",  
                          default=False, help="run the commandline version of sumo")  
    options, args = opt_parser.parse_args()  
    return options
```

```
def run():  
    traci.init(int(PORT))  
    step = 0  
    while traci.simulation.getMinExpectedNumber() > 0:  
        traci.simulationStep()  
        step += 1  
    traci.close()
```

```
# this is the main entry point of this script  
if __name__ == "__main__":  
    options = get_options()  
  
    # check binary  
    if options.nogui:  
        sumoBinary = checkBinary('sumo')  
    else:  
        sumoBinary = checkBinary('sumo-gui')
```

```
sumoProcess = subprocess.Popen([sumoBinary,  
                                '-n', mapFile,  
                                '-r', routeFile,  
                                '--remote-port', PORT,  
                                '--tripinfo-output', tripInfoFile], stdout=sys.stdout,  
                                stderr=sys.stderr)  
  
    run()  
  
    sumoProcess.wait()
```

